

## ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ И РЕЖИМ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

УДК 556.54:551.468(262.32)

### НАВОДНЕНИЯ В ВЕНЕЦИАНСКОЙ ЛАГУНЕ И ИХ ПРИЧИНЫ<sup>1</sup>

© 2021 г. М. В. Михайлова\*

*Институт водных проблем РАН, Москва, 119333 Россия*

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

Поступила в редакцию 16.12.2020 г.

После доработки 15.01.2021 г.

Принята к публикации 21.01.2021 г.

Рассмотрены причины и особенности формирования штормовых нагонов в Венецианской лагуне. Описаны опыт наблюдений за уровнем моря в Венеции и история наводнений, вызванных штормовыми нагонами, в частности “аква альта” 1966 и 2019 гг. Отмечено увеличение частоты штормовых нагонов за последние 60 лет. Рассмотрены гидротехнические меры для защиты Венеции от наводнений.

*Ключевые слова:* Венецианская лагуна, штормовые нагоны, “аква альта”, наводнения, уровень моря, просадка грунта, MOSE.

**DOI:** 10.31857/S0321059621050138

Прибрежные районы, особенно в условиях низменного рельефа, подвержены влиянию повышения уровня моря, приливов и штормовых нагонов. К таким районам относятся объединенная дельта рек Рейн, Маас и Шельда (так называемая Голландская дельта), объединенная дельта Ганга и Брахмапутры в Индии, дельта Миссисипи в США и дельта Невы в России. В похожей ситуации находится северо-западное побережье Адриатического моря, включающее Венецианскую лагуну и дельту р. По, поверхность которого лежит ниже уровня моря.

В лагуне на островах расположена Венеция, некогда главный город Венецианской республики, а теперь – крупный морской порт, транспортный узел, важный промышленный и культурный центр (островная часть города включена в Список Всемирного наследия ЮНЕСКО). В течение многих веков лагуна и город подвергались воздействию сильных штормовых нагонов, вызванные ими наводнения имели катастрофический характер и наносили ущерб городскому хозяйству и населению. Поэтому исследования лагуны всегда представляли для венецианцев не только научный, но и практический интерес. Результаты крупномасштабных исследований, проведенные итальянскими специалистами в последние 30 лет, могут помочь в понимании сложных процессов взаимодействия приливов, штормовых нагонов, изменения уровня моря, просадки грунта. Задача

статьи – аналитический обзор результатов исторических и современных гидрологических исследований Венецианской лагуны, выявление причин участвовавших наводнений.

Для российских специалистов в области изучения устьевых областей рек, морских берегов результаты исследования Венецианской лагуны могут представлять интерес не только с познавательной, но и с научной точки зрения (в отечественной научной литературе публикаций об этом объекте нет).

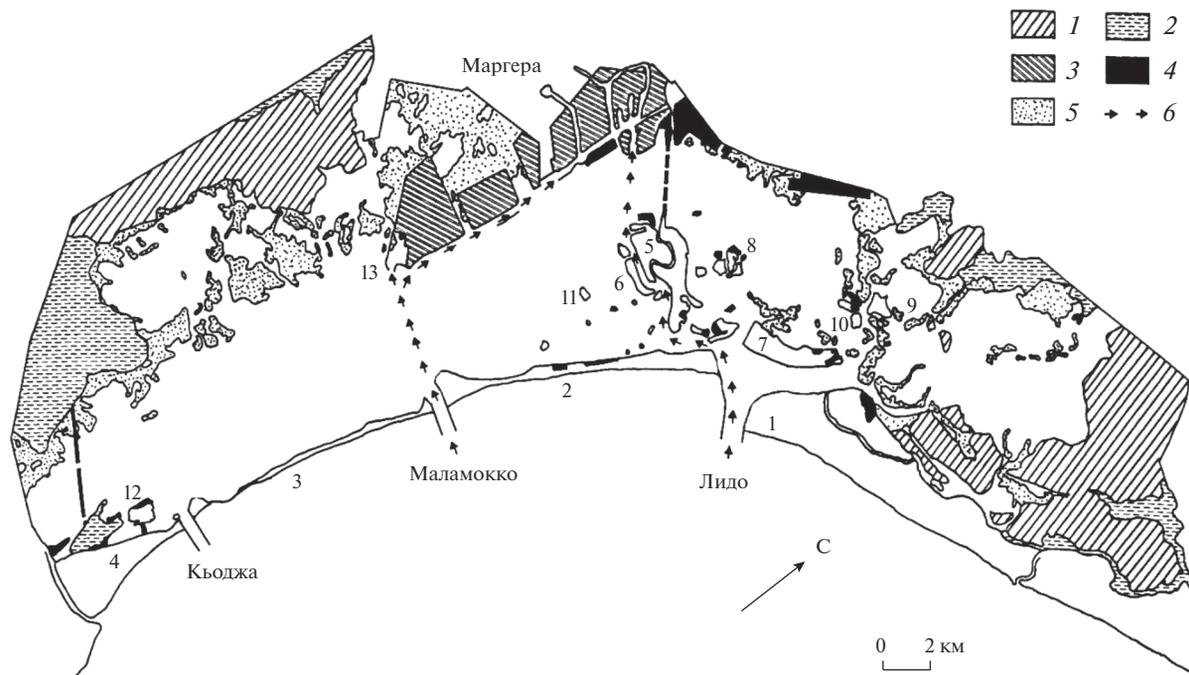
#### ВЕНЕЦИАНСКАЯ ЛАГУНА, ЕЕ МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И ИСТОРИЯ ФОРМИРОВАНИЯ

*Сведения о современной Венецианской лагуне*

Венецианская лагуна – самая крупная в Италии (рис. 1). Лагуна с севера ограничена р. Силе, с юга – р. Brenta. От Адриатического моря лагуну отделяет серия песчаных береговых баров Каваллино, Лидо, Пеллестрина и Кьоджа длиной 60 км [18]. Водобмен лагуны с Адриатическим морем происходит через три пролива: Лидо, Маламокко и Кьоджа (ширина 800, 400 и 380 м соответственно [18]). Венецианская лагуна имеет продолговатую изогнутую форму; ее площадь составляет ~550 км<sup>2</sup> [18, 22], длина 50–55 км [4, 28], ширина 8–14 км [4], средняя глубина 1.2 м. Площадь водосборного бассейна лагуны составляет, по разным данным, от 1800 до 2000 км<sup>2</sup> [18, 22, 28].

Около четверти площади лагуны (140 км<sup>2</sup>) занято илистыми отмелями (“bagene”), частично

<sup>1</sup> Работа выполнена в рамках Государственного задания ИВП РАН (тема 0147-2019-0001, государственная регистрация АААА-А18-118022090056-0).



**Рис. 1.** Венецианская лагуна. Береговые бары: Каваллино (1), Лидо (2), Пеллестрина (3), Кьоджа (4). Острова: Венеция (5), Джудекка (6), Сан-Эрасмо (7), Мурано (8), Торчелло (9), Бурано (10), Сакка-Сессола (11), Кьоджа (12), Сан-Леонардо (13). 1 – рыбоводческие хозяйства; 2 – площади, занятые под сельское хозяйство; 3 – обвалованные отмели; 4 – урбанизированные территории; 5 – необвалованные отмели; 6 – судоходные каналы. Основа картосхемы из [26].

заболоченными и обнажающимися только во время отлива. Отмели, которые находятся вдоль каналов, образованы наносами, взмученными со дна каналов приливными течениями. Другие отмели сформированы наносами, вынесенными речными притоками. Отмели имеют разную площадь, распределены по лагуне очень неравномерно. Эти илистые отмели представляют собой своеобразные экосистемы с характерными животными и растениями, которые адаптировались к изменениям солености вод. Во время прилива отмели поглощают большой объем воды, который частично отдают во время отлива. Действуя как губки, они оказывают регулирующее воздействие на уровень воды в лагуне [28].

Еще одна особенность Венецианской лагуны – многочисленные острова, многие из которых находятся в ее центральной части. Острова образовались в результате, во-первых, отложения продуктов эрозии дна лагуны и литоральной зоны (они накапливались на отмелях под воздействием волн и течений); во-вторых, – отложения наносов, выносимых речными притоками в районах с замедленным водообменом. Кроме того, несколько островов созданы искусственно. Так, в 1870 г. был построен о. Сакка-Сессола (0.16 км<sup>2</sup>), а в 1960 г. – о. Тронкетто (0.18 км<sup>2</sup>). На некоторых

островах были основаны города (например, Венеция, Мурано, Бурано), на других – созданы лавареты, монастыри, больницы. Во времена Наполеона ряд небольших островов использовался как редуты. В настоящее время большинство островов пустынные или находятся в относительно запущенном состоянии [28]. Самые большие острова в лагуне – Венеция (площадь 5.17 км<sup>2</sup>), Сант-Эрасмо (3.26 км<sup>2</sup>), Мурано (1.17 км<sup>2</sup>), меньшие по размеру – Кьоджа, Джудекка, Маццорбо, Торчелло, Сант-Елена, Ла-Чертоза, Бурано, Тронкетто, Сакка-Физола, Сан-Микеле, Сакка-Сессола, Санта-Кристина и др. (рис. 1)

Административно большая часть Венецианской лагуны относится к г. Венеции (столице провинции Венето), а ее юго-западная часть – к провинции Падуя.

*История формирования Венецианской лагуны*

Венецианская лагуна образовалась 6–7 тыс. лет назад во время фландрской морской трансгрессии, когда воды Адриатического моря затопили приморскую часть палеодолины р. По [4]. Согласно описаниям Витрувия, Страбона, Ливия и Плиния, северо-восточное побережье от Равенны до Триеста представляло собой непрерывную це-

почку лагун и болот [25]. На месте современной Венецианской лагуны и дельты р. По было семь водоемов эстуарного типа (“*Septem Maria*”), соединяющихся с Адриатическим морем девятью проливами. Большинство этих водоемов заполнилось наносами, и только несколько лагун остались до сегодняшнего дня, включая самую крупную — Венецианскую. Формирование лагуны происходило при сложном сочетании естественных и антропогенных факторов: речного стока воды и наносов, просадки грунта, эвстатического повышения уровня моря, проникновения соленых морских вод, эрозии морского дна, отведения речного стока, углубления проливов и каналов. Об этих факторах будет сказано ниже.

Основное влияние на формирование лагуны оказало интенсивное отложение речных наносов впадавших в нее рек — Адидже, Brenta, Баккильоне, Силе, Пьяве, а также дельтового рукава р. По. Отложение наносов этих рек на общем маленьком отрезке устьевого взморья и вдольбереговой поток наносов р. По с Ю привели к формированию серии береговых баров, перегораживающих выход из лагуны в море. Реконструкция эволюции лагуны, сделанная в 1799 г. венецианским историком Теодоро Вьеро, подтверждает, что приблизительно в 1000 г. н. э. у лагуны было девять проливов [12]. Однако в некоторых литературных источниках указывается восемь проливов [14].

Предки венецианцев (венеты) начали заселять регион, окружающий лагуну, с VIII в. до н. э. Они были главным образом купцами; купцами станут и венецианцы. В лагуне находили убежище от нашествий варваров изгнанники с материка. Датой основания г. Венеции принято считать 25 марта 421 г. (День Благовещения).

Жизнь на островах и отсутствие пахотной земли способствовали развитию мореплавания. Со временем Венеция стала центром интенсивной торговли между странами Европы и Востока. В Европу попадали янтарь, воск, шелк, рис, кофе, пряности. В обратную сторону шли серебро, железо, шерстяные ткани, лес, зерно. Венеция и сама производила ценные товары: соль, муранское стекло и др. Так, лагуна стала основой существования Венецианской республики. Поэтому вся история Венеции сопровождалась крупномасштабными работами по отведению рек, несущих в лагуну большое количество наносов. Еще в XIV в. была построена дамба для отвода вод р. Brenta за пределы лагуны, в 1639 г. отведена Пьяве, в 1683 г. — Силе. Эти работы продолжались до XVIII в., пока воздействие моря снова не стало доминирующим фактором, увеличивающим соленость вод лагуны и угрожающим затопить береговой бар между проливами Лидо и Маламокко. Именно тогда венецианцы стали стро-

ить защитные стенки (“*murazzi*”), которые существуют до сих пор [14].

В настоящее время в лагуну впадают лишь несколько небольших рек с суммарным средним расходом  $\sim 32$  м<sup>3</sup>/с. Наибольший вклад вносят реки Силоне, Дезе, Навильо-Брента и Тальо-Нуовиссимо (две последние канализованы) [22]. Сток наносов, поступающих в лагуну, — 33 тыс. т/год [22].

Важно отметить, что отведение рукава р. По из лагуны привело к изменению стадии формирования дельты этой реки. На протяжении последних 2.5 тыс. лет ведущим в развитии дельты реки был процесс естественной миграции ее рукавов по дельтовой равнине. В итоге на побережье за это время сформировалось несколько крупных дельтовых лопастей. Предпосылкой формирования одной из таких лопастей был прорыв ( $\sim 1150$  г.) в районе деревни Фикароло, находящейся выше по течению от г. Феррара, в результате которого речные воды устремились на СВ в северную часть дельтовой равнины р. По. Новый водоток Фикароло быстро превратился в главный рукав дельты. Он дал начало формированию новой дельтовой лопасти, позже названной “дельтой эпохи Возрождения”. Левый рукав в приморской части этой лопасти получил название Форначи; впоследствии этот рукав стал впадать в Венецианскую лагуну. К 1500 г. южная часть лагуны уже была на грани занесения наносами Форначи, что представляло угрозу деятельности порта. Чтобы избежать этого, венецианцы в 1604 г. перенаправили сток рук. Форначи из лагуны по каналу Тальо-ди-Порто-Виро в море. Так началось формирование современной дельты По [2].

Начиная с XIX в. главное вмешательство человека было связано с реконструкцией трех проливов между лагуну и морем. Для того чтобы в лагуну могли заходить большие суда, в 1810—1865 гг. в прол. Маламокко были сооружены молы, в результате чего глубина в канале увеличилась до 9 м. В 1888 г. такие же молы были построены в проходе Лидо, что к 1905 г. увеличило его глубину до 9 м. Навигационные каналы внутри лагуны были углублены между 1820 и 1903 гг., было изъято  $\sim 36$  млн м<sup>3</sup> отложений. В 1930—1934 гг. сооружены молы в прол. Кьоджа, в итоге глубина в нем была увеличена до 8 м. В то же самое время был углублен канал им. Виктора-Эммануила III между портами Маргера и Венеция. И наконец, в 1963—1969 гг. был выкопан новый канал (так называемый “*canale dei petroli*”) для судов большого тоннажа и нефтяных танкеров. Глубина канала на участке между Маламокко и нефтяным терминалом у о. Сан-Леонардо составляет 14.5 м, между Сан-Леонардо и Маргера — 12 м [14] (рис. 1).

Начиная с XIX в. площадь лагуны стала постепенно уменьшаться. К концу XIX в. часть площа-

ди лагуны была отведена под рыбоводческие хозяйства (“valli da pesca”); в XX в. занята под сельское хозяйство, дороги и аэропорт, новые рыбоводческие хозяйства.

Все эти мероприятия вызвали резкое изменение естественной эволюции лагуны, в частности увеличилась соленость воды, в настоящее время ее величина близка к солености Адриатического моря (30–33‰).

### “АКВА АЛЬТА” И ИСТОРИЯ НАВОДНЕНИЙ В ВЕНЕЦИИ

Явление “аква альта” (“acqua alta”), или “высокая вода”, очень хорошо известно даже тем, кто никогда не был в Венеции. “Аква альта” обычно случается поздней осенью и зимой, когда сочетание приливов, сильного ветра сирокко и штормовых нагонов вызывает большой приток морской воды в Венецианскую лагуну. “Аква альта” наступает, когда уровень моря превышает 80 см относительно нуля поста (за нуль поста принят средний уровень моря, измеренный на гидрологическом посту Пунта-делла-Салюте в 1897 г.). Уровень тротуаров в Венеции в среднем на 80 см выше отметки среднего уровня моря, а некоторые части города (например, площадь Сан-Марко) – всего лишь на 55 см. Поэтому при уровне воды >80 см начинается затопление пониженных частей города. В большинстве случаев наводнение в Венеции охватывает небольшую территорию вокруг площади Сан-Марко и продолжается несколько часов. Когда уровень моря поднимается на >110 см, под водой оказывается ~12% площади Венеции, на 120 см – ~35, 130 см – 69, 140 см – 90%, 180 см – почти вся Венеция бывает затоплена [3]. “Аква альта” наносит ущерб памятникам, фундаментам городских зданий, берегам каналов, набережным, угрожает историческому и художественному наследию города.

Первое описание “аква альта” относится к 589 г. [12], хотя, несомненно, этих событий и раньше было немало. Штормовые нагоны с 787 по 1867 г., приведшие к “аква альта”, подробно описаны в статье [13], содержащей уникальный набор исторических данных, критически рассмотренных и прокомментированных авторами.

Поскольку в исторических хрониках термины “аква альта” и “escrescenza” (подъем, повышение) применялись к наводнениям, вызванным как нагонами, так и морскими приливами и речными паводками, в трактовке каждого конкретного события авторы [13] учитывали контекст. Характеристики наводнений, как правило, были связаны с повседневной жизнью и препятствиями или повреждениями, которые они причиняли городу и его жителям. Приблизительный “масштаб бедствия” был таков: 1) “Сенат не собирает-

ся” (уровень воды соответствует современным 90–100 см); 2) “вода проникает в дома и церкви” (110–150 см), “вода повреждает товар” (90–150 см), “вода вторгается на улицы” (90–130 см), “невозможно пройти под мостами на лодке” (80–110 см); 3) “затоплены колодцы”, “затоплен город” (110–150 см); 4) “по площади Сан-Марко и по улицам можно плыть на корабле” (130–200 см). Авторам [13] также было сложно точно интерпретировать высоту подъема уровня воды, о котором сообщается в манускриптах, поскольку за прошедшее время архитектурные элементы зданий, взятые за “точку отсчета”, изменились. Это связано с тем, что здания были построены на рыхлых почвах и болотах и проседали под собственной тяжестью.

Следует особо отметить значительное наводнение 5 ноября 1686 г. О нем свидетельствуют несколько хроник того времени, одна из которых написана ученым: “вода достигла открытой веранды Лоджии” (входа в колокольню Сан-Марко) (“l’acqua arrivò al livello del pavimento esterno della Loggia”). Возможно, это было самое сильное наводнение в истории Венеции. В конце 1960-х гг. ученые, сравнив его с катастрофическим наводнением 4 ноября 1966 г., пришли к выводу, что с учетом реконструкции Лоджии и просадки грунта уровень воды в 1686 г. мог достигать отметки 254 см [15].

Безусловно, “аква альта” за период с 787 по 1867 г. трудно сопоставить с современными наводнениями, какие-то события могут быть переоценены очевидцами, но основные выводы из описаний многочисленных случаев “аква альта”, перечисленные в [13], можно сделать. Почти все наводнения в Венецианской лагуне за этот период вызваны, в первую очередь, сильными штормовыми нагонами и ветром сирокко, редкие наводнения произошли в результате повышения уровня моря во время сизигийного прилива, ливней, гроз, сильного волнения, землетрясений или сочетания нескольких факторов, но, как правило, на фоне штормового нагона.

С началом инструментальных наблюдений за уровнем моря с помощью мареографа сведения о наводнениях, вызванных штормовыми нагонами, стали более подробными. Наиболее известные случаи “аква альта” в XX и XXI вв., уровень моря при которых превышал 140 см, приведены в хронологическом порядке в табл. 1. На сайте [17] для каждого из 20 случаев приведены описание атмосферной ситуации в дни “аква альта”, карты погоды, графики атмосферного давления, ветра, наблюдаемого уровня моря и т.д.

#### *Большое наводнение 1966 г. (“Acqua Granda”)*

Катастрофическому наводнению 1966 г. предшествовала следующая синоптическая ситуация:

**Таблица 1.** Сведения о значительных наводнениях в Венеции в XX и XXI вв.

№	Дата	Уровень моря над нулем поста Пунта-делла-Салюте, см	№	Дата	Уровень моря над нулем поста Пунта-делла-Салюте, см
1	16 апреля 1936 г.	147	11	16 ноября 2002 г.	147
2	12 ноября 1951 г.	151	12	1 декабря 2008 г.	156
3	15 октября 1960 г.	145	13	23 декабря 2009 г.	144
4	4 ноября 1966 г.	194	14	25 декабря 2009 г.	145
5	3 ноября 1968 г.	144	15	24 декабря 2010 г.	144
6	17 февраля 1979 г.	140	16	1 ноября 2012 г.	143
7	22 декабря 1979 г.	166	17	11 ноября 2012 г.	149
8	1 февраля 1986 г.	158	18	12 февраля 2013 г.	143
9	8 декабря 1992 г.	142	19	29 октября 2018 г.	156
10	6 ноября 2000 г.	144	20	12 ноября 2019 г.	187

над Испанией образовалась тропосферная ложбина (область относительно низкого атмосферного давления), 3 ноября ложбина углубилась и начала двигаться на В, усиленная местной системой низкого давления и вторичной небольшой депрессией из Северной Африки. Сама по себе депрессия не была особенно выражена; однако зональный градиент был усугублен усиливающимся антициклоном над Юго-Восточной Европой с восточной стороны Адриатического моря. Это привело к очень сильному меридиональному потоку влажного воздуха, который устремился в Адриатику, ограниченную Апенниннами с З и Динарским нагорьем с В. В результате в центральной и северо-восточной части Италии прошли сильнейшие дожди; в северо-восточной за два дня выпало рекордное количество осадков — >750 мм. Реки Пьяве, Брента и Силе больше не могли справляться с дождевыми паводками, излишки речной воды стали поступать в Венецианскую лагуну.

Над всем Адриатическим морем дул интенсивный и устойчивый сирокко [9], приведший к большим волнам в его северном секторе. В результате совместного действия ветра, нагона и волн возник “идеальный шторм” в районе Венецианской лагуны; у берегового бара Лидо в некоторых местах были прорваны “murazzi”. Штормовой нагон распространился через проливы и бреши в лагуну и затопил город и близлежащие острова. Впервые с начала регулярных наблюдений за уровнем (1872 г.) 4 ноября 1966 г. в 18 ч у Пунта-делла-Салюте был достигнут его исторический максимум — 194 см (рис. 2а). Ветер дул вдоль главной оси Адриатического моря с ЮВ на СЗ более 24 ч. Скорости ветра в среднем составляли 24, максимум — 28 м/с [29]. Ущерб был огро-

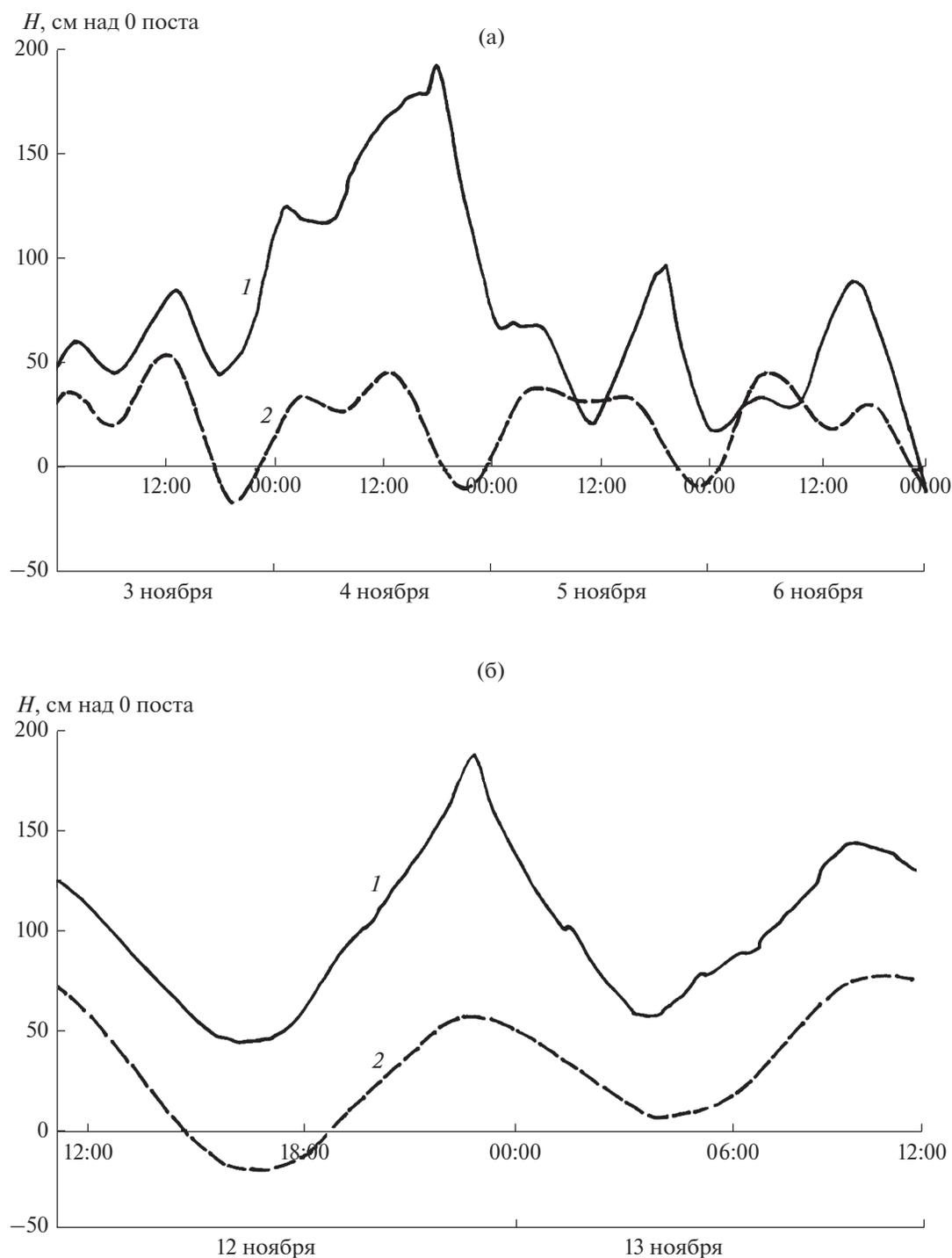
мен, большая часть города оказалась без электричества, газа, телефонной связи. Наихудших последствий удалось избежать благодаря тому, что ветер вечером сменил направление и ослабил шторм.

#### *Наводнение 2019 г.*

Весь 2019 г. отличался неблагоприятными погодными условиями и активной штормовой деятельностью. В 2019 г. зафиксировано 28 (из них 15 в ноябре) штормовых нагонов, при которых отметки уровня превысили 110 см; 13 нагонов, при которых уровни превысили 120 см (семь в ноябре); пять нагонов, уровни которых  $\geq 140$  см (четыре в ноябре); три нагона, уровни которых  $\geq 150$  см (в течение шести дней с 12 по 17 ноября) [17].

В ноябре средиземноморский регион подвергся воздействию глубокого циклона, что привело к резкому ухудшению погоды над итальянским полуостровом. Над Адриатикой дул сильный юго-восточный ветер (сирокко), на восточном побережье Италии наблюдались волны высотой ~4 м. Метеорологическая ситуация хорошо прогнозировалась: ожидалось нагонное повышение уровня ~70 см — высокое, но не исключительное в сравнении с другими историческими событиями [11].

Однако совпадение нескольких факторов привело к катастрофическому штормовому нагону и второму по разрушительности наводнению в истории Венеции. Так, 12 ноября было полнолуние: нагон совпал с одним из максимумов сизигийного прилива. Кроме того, на фоне необычно высокого уровня Средиземного моря в ноябре 2019 г., отражающего общую аномальную атмосферную депрессию над его бассейном, над Адриатикой образовался циклон меньшего масштаба, кото-



**Рис. 2.** Изменения наблюдаемого (1) и астрономического приливного уровня воды (2) во время штормовых нагонов 4 ноября 1966 г. (а) и 12 ноября 2019 г. (б) на посту Пунта-делла-Салюте, по данным [16].

рый быстро продвигался на С. Устойчивый и продолжительный сирокко (средняя скорость ветра 100, порывы до 110 км/ч) нагнетал воду в Венецианскую лагуну, затрудняя отток через прол. Отранто [17].

Уровень воды в Венеции во вторник 12 ноября в 22 ч 55 мин достиг максимальной отметки —

187 см (второй по величине за всю историю наблюдений) (рис. 2б). 90% территории исторического центра оказалось под водой. Площадь Сан-Марко была залита на >1 м, а базилика Сан-Марко затоплена шестой раз за 1200 лет. В районе набережной Рива-дельи-Скьявони затонули три речных трамвайчика — вапоретто. От штормового

нагона пострадало все венецианское побережье, в г. Кьоджа уровень воды был близок к 190 см.

Ситуация была бы намного хуже, если бы нагон совпал с максимумами прилива на 12 ч раньше или позже: пики были бы на ~25 см выше и уровень воды поднялся бы на ~210 см.

В среду 13 ноября уровень составил 145, в пятницу 15 ноября – 154, в воскресенье 17 ноября – 152 см [17].

#### *Наводнение 1979 г.*

22 декабря 1979 г. Венеция пострадала от наводнения, уступавшего по силе только событиям 4 ноября 1966 и 12 ноября 2019 гг.

20 и 21 декабря над алжирским и тунисским побережьем находился центр атмосферной депрессии, 22 декабря он переместился в центральную часть Лигурийского моря, а фронт окклюзии охватил весь итальянский полуостров. Однако главной причиной штормового нагона стал сильный ветер, точнее “scontrauga” (“столкновение”) сирокко (скорость ветра достигала 74 км/ч) в средней и нижней частях Адриатики и боры (78 км/ч) в верхней части Адриатики. Несмотря на то, что нагон был спустя 3 ч после максимума прилива, уровень в 9 ч 10 мин достиг 166 см и оставался >110 см следующие 7 ч. На нагон наложились сейшевые колебания амплитудой 64 см [9, 17].

#### *Наводнение 1986 г.*

Причиной штормового нагона 1 февраля 1986 г. послужило расширение области низкого атмосферного давления в западной части Средиземного моря в последние дни января и на Корсике 1 февраля, вызвавшее сильный сирокко над центральной и южной частями Адриатического моря (в г. Бари была зарегистрирована скорость ветра 105 км/ч) и бору в верхней части Адриатики (в г. Тессера – 80 км/ч). Эти ветры 1 февраля в 4 ч способствовали подъему уровня на 101 см (на 1 ч позже максимума прилива – 66 см в 3 ч). Пик на посту Пунта-делла-Салюте пришелся на 3 ч 45 мин утра и составил 158 см (четвертое по силе наводнение после событий 1966, 2019 и 1979 гг.) [9, 17].

### ПРИЧИНЫ НАВОДНЕНИЙ В ВЕНЕЦИАНСКОЙ ЛАГУНЕ

#### *Просадка грунта*

Просадка грунта в прибрежных районах – широко распространенный процесс, имеющий как естественное, так и антропогенное происхождение.

Естественная просадка грунта в венецианском регионе в прошлом отражала в основном текто-

нические процессы; в период позднего плейстоцена и голоцена она составляла ~1.3 мм/год [10], что было вызвано уплотнением рыхлых отложений во время естественной эволюции лагуны. По оценкам, приведенным в [5], в 1369–1872 гг. средняя скорость естественной просадки составляла 0.2 мм/год.

Антропогенная просадка грунта происходит вследствие уплотнения отложений в результате их обезвоживания. Так, в 1930-х гг. в венецианском регионе началась интенсивная эксплуатация шести артезианских водоносных горизонтов, находящихся в верхних 350 м тысячеметрового слоя неконсолидированных венецианских четвертичных отложений; она достигла пика в 1950-е и 1960-е гг. В период с 1952 по 1969 г. средняя просадка в районе откачки вод и в г. Венеции составила 5 и 6 мм/год, максимальная – 14 и 17 мм/год соответственно [5]. В 1970-х гг. были приняты решительные меры по сокращению чрезмерной эксплуатации этих скважин и темпы просадки замедлились, а к 1973 г. антропогенная просадка почти прекратилась [10].

#### *Повышение уровня моря*

По данным [20], в 1990–2010 гг. эвстатическое повышение уровня Мирового океана составило ~3 мм/год. Согласно прогнозам (их обзор дан в [1, 20]), уровень океана в XXI в. продолжит повышаться, что связано с современными изменениями климата, усилением теплового расширения верхнего слоя морских вод, и к концу XXI в. скорость его подъема может возрасти до 8–16 мм/год.

Многолетние изменения среднегодовых уровней воды в береговых зонах (особенно во внутренних морях) могут существенно отличаться от осредненных величин повышения уровня Мирового океана. Так, уровень Атлантического океана повышался со скоростью 1.7, а Средиземного моря – всего 1.2 мм/год. Это объясняется тем, что у Средиземного моря отрицательный пресноводный баланс: оно служит огромным испарителем морских вод, поступающих из Атлантики через Гибралтарский пролив.

Данные наблюдений на гидрологических постах в береговой зоне дают сведения лишь о так называемом относительном повышении уровня моря (ОПУМ), который складывается из обусловленного климатическими факторами эвстатического повышения уровня моря (ЭПУМ) и просадки грунта, достигающей иногда очень больших величин. В настоящее время величина ОПУМ, как правило, превышает величину ЭПУМ. Разделить наблюдаемые на постах изменения уровня моря на эвстатические и обусловленные вертикальными движениями, включая просадку грунта, довольно трудно.

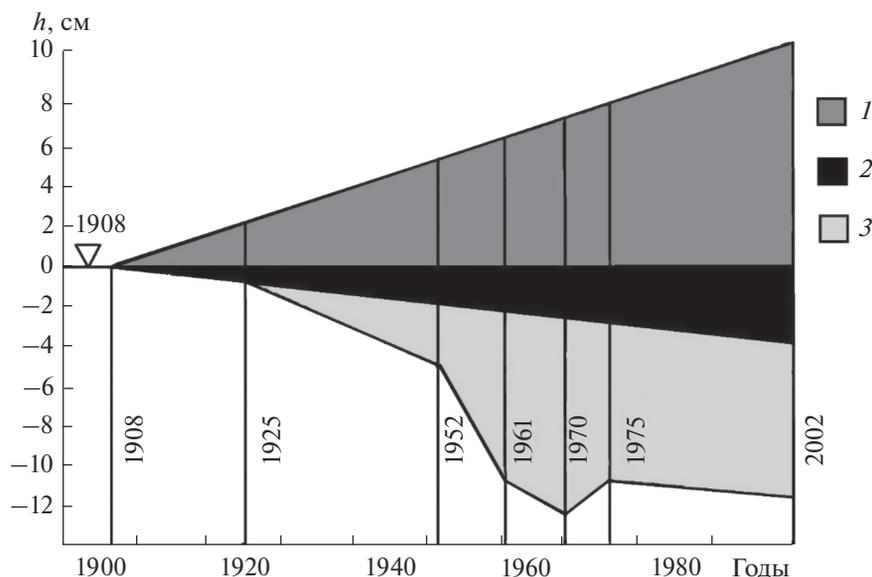


Рис. 3. Три составляющие ОПУМ в Венеции. ЭПУМ (1), естественная (2) и антропогенная просадка (3) по [9].

В работе [21] проанализированы данные по 23 постах в Средиземном море (в том числе по девяти в Адриатическом море). ЭПУМ на постах, ряды данных по которым составляют около 100 лет, имеет следующие значения, мм/год: Марсель — 1.25, Генуя — 1.22, Триест — 1.14. Наибольший рост уровня на посту в Венеции — 2.4 мм/год — объясняется именно просадкой грунта. Изменения уровня моря за более короткие периоды также происходили с наибольшей скоростью в Венеции: в 1896–1922 гг. — 3.7, в 1920–1950 гг. — 2.59, а в 1950–1970 гг. — 4.70 мм/год [21].

Рис. 3 иллюстрирует изменение вклада просадки грунта в ОПУМ в Венеции по [10]. В статье [21] приведена количественная оценка изменения среднего уровня моря в Венеции по данным за 1872–2019 гг. (без учета просадки). ОПУМ составило 1.23 мм/год.

### Приливы

Приливы в Средиземном и Адриатическом морях определяются в основном распространением приливной волны из Атлантического океана. Распространение приливной волны в Адриатике происходит вокруг амфидромной точки, где амплитуда прилива равна нулю. Эта точка находится между Анконой и Задаром (хорватское побережье). Когда прилив входит в прол. Отранто, он движется через Адриатическое море против часовой стрелки со скоростью ~130 км/ч. Сначала прилив распространяется вдоль побережья Далмации на С, проходит мимо Истрии и продолжает движение к Триесту и Градо, затем поворачивает на З к Линьяно, Венеции и Кьоджа, следует вдоль

побережья Италии в направлении к городам Анкора, Вьесте и Бриндизи и завершает свой цикл в Отранто [19]. Прилив в Адриатическом море смешанный, полусуточный (12 ч 12 мин) и суточный (24 ч 25 мин), его средняя величина — 1.0 м [18].

### Ветер, сейши и штормовые нагоны

Самые сильные ветры в Адриатике — бора и сирокко — бывают зимой. Бора — это холодный ветер с СВ; его средняя скорость в некоторых местах достигает 15 м/с. Сирокко приносит теплый средиземноморский воздух с ЮВ, его средняя скорость ~10 м/с. Оба ветра обычно связаны с перемещением циклонов, дуют по несколько дней и следуют друг за другом: когда циклон приближается к Адриатике, дует сирокко, когда циклон покидает Адриатику, возникает бора. Поскольку сирокко дует вдоль главной оси Адриатического моря и мало взаимодействует с горными хребтами, он вызывает поступление больших объемов воды в северную часть Адриатического моря и приводит к повышению уровня, особенно сильному в Венецианской лагуне. Когда дует сирокко, уровень моря повышается: от 20 см при скорости ветра 10 км/ч до 100 см при 60 км/ч [5].

Быстрое изменение атмосферного давления и интенсивности ветра над Адриатическим морем вызывает свободные колебания (сейши). Основные сейши в Адриатике имеют первый резонансный период ~21 ч и второй резонансный период 11 ч, что близко к периодам приливов. Сейши могут длиться несколько дней. В Венеции среднее повышение уровня моря, вызванное сейшами, составляет 45 см.

## ИСТОРИЯ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА УРОВНЕМ ВОДЫ

Когда нет никаких количественных данных об уровне моря и приливах, информацию о них и “аква альта” можно получить только качественную, из документальных свидетельств: хроник начиная с VI в., линий водорослей, высоты ступеней морских лестниц, картин старых мастеров и ранних фотографических снимков.

В Венеции есть понятие “Comune Marino” (СМ), что можно приближенно перевести на русский язык как “отметка среднего уровня моря”. Это линия, совпадающая с горизонтальной темно-зеленой полосой водорослей на стенах зданий и набережных. Этим фототрофным водорослям нужно солнце для биосинтеза хлорофилла и вода для жизни — т.е. среда, которая может быть попеременно влажной во время прилива и сухой во время отлива. По верхней линии этого пояса водорослей венецианцы в прошлом отмечали среднее положение уровня моря при приливе. Этот маркер давал строителям и инженерам некоторое представление о тенденции повышения уровня моря, необходимое для определения высоты причалов и арочных мостов, для строительства домов, дворцов и других работ. Однако эти отметки были неточными, находились на разных уровнях не только в разных частях города, но даже на противоположных сторонах одного и того же канала.

Уже к концу XVII в. Водный магистрат (“Magistrato alle Acque”) постановил, что СМ будет всегда обозначаться выгравированной на камне набережной горизонтальной линией с заглавной буквой “С” над ней.

В историческом центре Венеции удалось идентифицировать и переписать 111 знаков СМ. Их отметки подтверждают, что принятый в настоящее время средний уровень моря (ноль поста Пунта-делла-Салюте) находится на 40–45 см ниже, чем в XVIII в. Поскольку нынешний верхний край зеленого пояса водорослей на берегах каналов на 75–80 см выше ноля поста, то с должным приближением можно считать, что всего за два столетия уровень воды поднялся на 30–40 см. Оценки эти не точны также из-за повреждения стен каналов и фундаментов зданий волнами и брызгами, создаваемыми моторными катерами и лодками; венецианцы называют это явление “motondoso”. Измерения итальянскими специалистами [7] в течение четырех дней положения СМ на 80 зданиях, выходящих на Гранд-канал, показали, что СМ =  $47 \pm 2$  см над нулем поста, т.е. в колебания уровня моря волны вносят вклад  $\sim 17 \pm 2$  см.

В 1727–1758 гг. художники Антонио Каналетто и его племянник Бернардо Белотто, используя портативную камеру-обскура, рисовали виды Венеции с поразительно точными деталями, в том

числе отображая положение СМ. Сравнивая уровень пояса водорослей на их картинах с сегодняшним и учитывая воздействие волнения на стенки зданий и каналов, создаваемого гребными и моторными лодками, можно оценить ОПУМ и его интенсивность за период с 1700-х по 2000-е гг. —  $61 \pm 12$  см и  $2.3 \pm 0.4$  мм/год соответственно. Интенсивность повышения уровня близка к рассчитанной за инструментальный период наблюдений — 2.4 мм/год [8].

Позже исследователями было установлено, что в 1571 г. Паоло Веронезе (1528–1588 гг.) также с помощью камеры-обскуры воспроизвел на картине “Мадонна семейства Куччина” дворец, на стене которого можно увидеть положение СМ. Сравнение уровня пояса водорослей на этой картине и современного дало величину ОПУМ  $92 \pm 9$  см [6]. Таким образом, ОПУМ в период между картинами Веронезе (1571 г.) и Каналетто (1727–1758 гг.) составило  $1.2 \pm 0.4$  мм/год (рис. 4).

Интересно, что сравнение положения нижних ступеней морских лестниц на каналах, которые строители дворцов в стилях разных эпох (готика, ренессанс, барокко) привязывали к определенному уровню моря, позволило ученым использовать лестницы в качестве новых свидетельств повышения уровня моря.

Самые первые измерения уровня моря с помощью рейки были сделаны в 1638 г. Франческо Ринуччини по заданию Галилео Галилея. Регулярные наблюдения за уровнем моря проводились в г. Венеции (в середине лагуны) с 1751 по 1769 г. и в г. Кьоджа (в юго-западной части лагуны) с 1779 по 1792 г. Наблюдения в Венеции проводил архитектор и гидротехник Томмазо Теманза (1705–1789 гг.), который ежедневно записывал метеорологические данные и данные об уровне моря. Наблюдения в г. Кьоджа проводил с 1779 по 1792 г. врач Джузеппе Вианелли (1720–1803 гг.). Высота уровня моря измерялась с помощью вертикальной рейки, разделенной на венецианские футы и дюймы и показывающей расстояние от морского дна. Эти данные, конечно, были более низкого качества, чем современные [27].

В Венеции регулярные инструментальные наблюдения за уровнем моря, а также за полными и малыми водами прилива начались в 1871 г. с помощью механического уровнемера Томсона типа поплавка, помещенного в стоячий колодец.

Первый гидрологический пост с уровнемером (мареографом) установлен инженером Томмазо Мати у Палаццо Лоредан на площади Санто-Стефано в  $\sim 100$  м от Гранд-канала (рис. 5а); статические измерения на нем начались 27 ноября 1871 г. В 1888 г. был открыт пост у Венецианского Арсенала. Посты на Санто-Стефано и у Арсенала были выведены из эксплуатации в 1911 и 1917 гг.

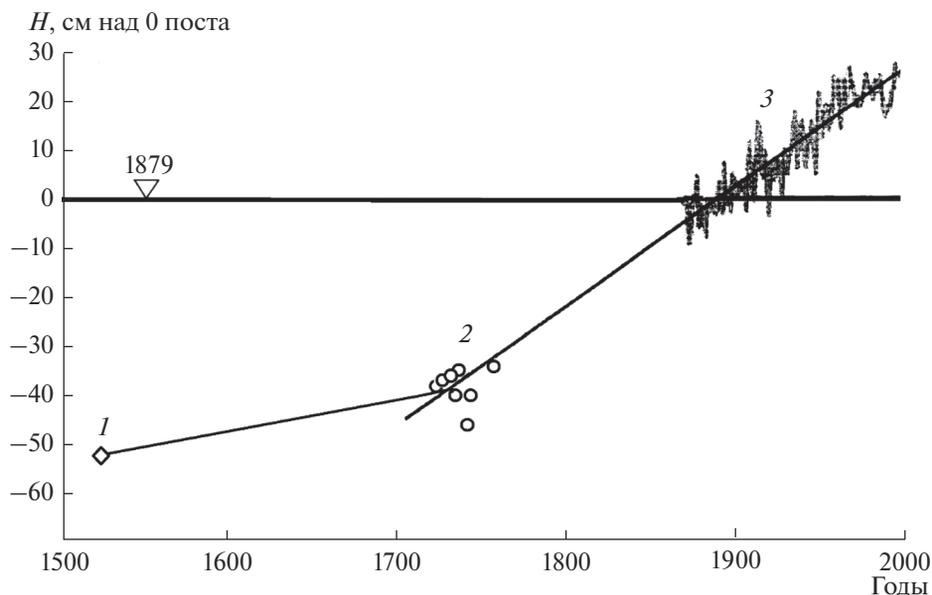


Рис. 4. Схема изменения уровня моря в Венеции: в 1571 г. по Веронезе (1), в 1727–1758 гг. по Каналетто и Беллотто (2) и данным поста Пунта-делла-Салюте в 1872–2002 гг. (3) [6, 8].

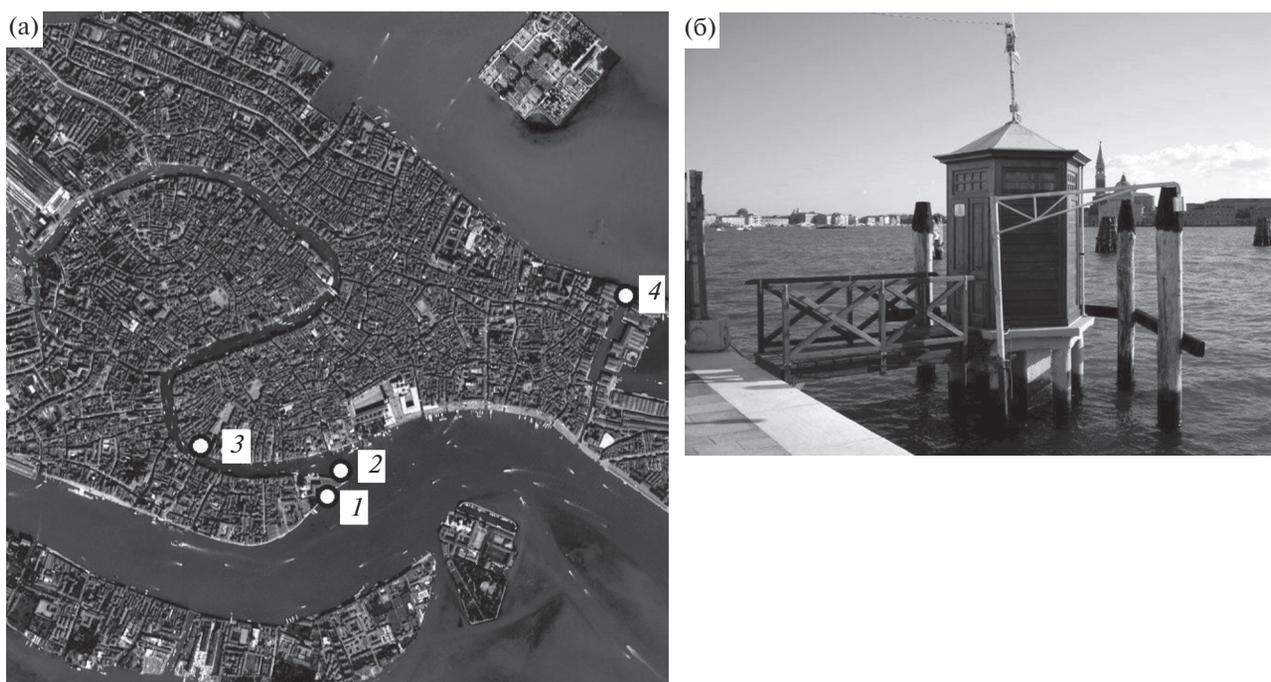


Рис. 5. Схема расположения гидрологических постов в Венеции: 1 – Пунта-делла-Салюте (ISPRA) на канале Джудекка; 2 – Пунта-делла-Салюте (CPSM) на Гранд-Канале; 3 – Санто-Стефано, 4 – Арсенале (космоснимок IKONOS 19.06.2004) (а); пост Пунта-делла-Салюте на канале Джудекка из [19] (б).

соответственно. В 1906 г. начал работу пост Пунта-делла-Салюте [24]. Сначала он находился на Гранд-канале около собора Санта-Мария-делла-Салюте, а в 1923 г. был перенесен на канал Джудекка. Этот пост действует под управлением Итальянского национального института охраны

окружающей среды и исследований ISPRA (“Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale”) (рис. 5б). С 2002 г. со стороны Гранд-канала возобновлена работа старого поста как дополнительного. Им управляет муниципальный центр

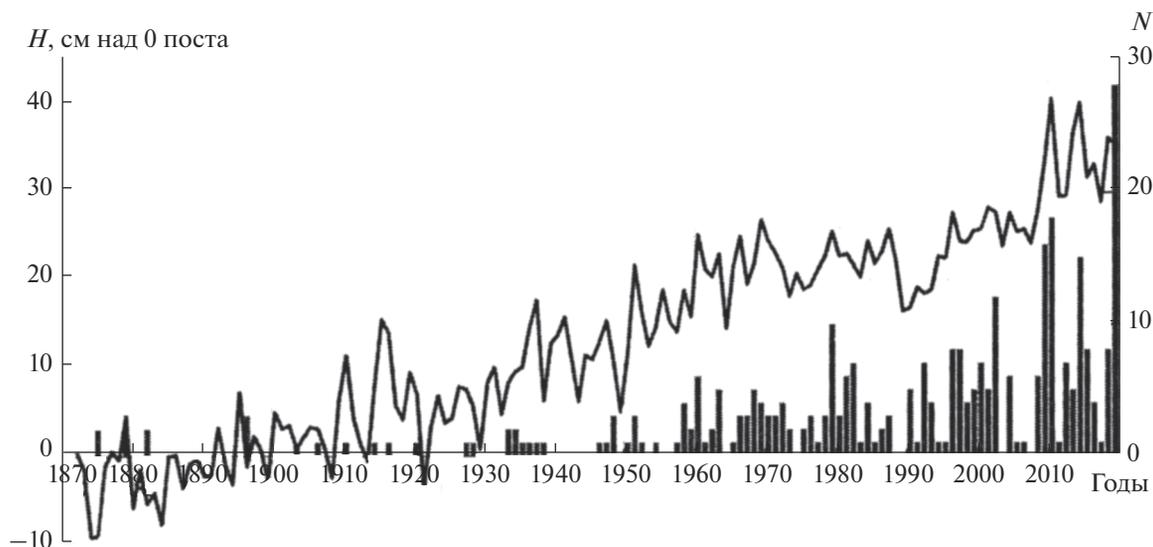


Рис. 6. График изменения уровня моря  $H$  и числа событий “аква альта”  $N$  на посту Пунта-делла-Салюте с 1839 по 2019 г.

по прогнозированию приливов CPSM (“Centro Previsione e Segnalazione Maree”).

Увязка данных мареографов на различных постах для получения единого непрерывного ряда данных об уровне воды потребовала точного знания нулей этих постов. До 1910-х гг. вертикальным опорным уровнем в Венеции был СМ. Томаззо Мати установил нуль поста на Санто-Стефано на 150 см ниже СМ 1825 г. В 1910 г. за нуль нового поста Пунта-делла-Салюте (“Zero Mareografico Punta Salute”) принят уровень, рассчитанный путем осреднения данных с 1885 по 1909 г. Он находится на 127.54 см выше нуля поста Санто-Стефано и на 22.46 см ниже СМ 1825 г. Этот пост стал главным ориентиром для г. Венеции и всей лагуны. Длина совмещенного ряда уровней воды с 1872 по 2019 г. составляет 148 лет. Кроме того, CPSM и ISPRA управляют 42 станциями в самой лагуне и в Северной Адриатике. Метеорологические и гидрологические данные по всем постам публикуются в реальном времени на сайтах [16, 19].

На рис. 6 приведен график изменения уровня моря на посту Пунта-делла-Салюте с 1839 по 2019 г. по [19].

#### МЕРЫ ПО ЗАЩИТЕ ВЕНЕЦИИ И ВЕНЕЦИАНСКОЙ ЛАГУНЫ ОТ ЗАТОПЛЕНИЯ

Департамент водного хозяйства Венеции регулярно проводит работы по укреплению берега лагуны, поднимает тротуары и пристани, чтобы при слабых наводнениях до них не добралась вода. Городские власти стараются улучшить экологи-

ческую обстановку в лагуне: предпринимают усилия, направленные на восстановление исчезнувших солончаковых болот, защиту еще не исчезнувших островков и отмелей, очистку дна каналов лагуны.

Венецианцы принимают “аква альта” как неотъемлемую часть повседневной жизни, но осознают, что ситуация с наводнениями будет усугубляться. Ожидается, что к 2050 г. средний уровень может повыситься на величину от 24 до 32 см [20]. Как Венеция справится с этой ситуацией?

Над способами защиты Венеции от воды думали не одно десятилетие. Наконец, в 1989 г. был предложен проект MOSE (“Modulo Sperimentale Elettromeccanico”, экспериментальный электро-механический модуль) [18]. Во всем мире этот проект известен под библейским именем Моисей (MOSE). Венецианцам, давно привыкшим к наводнениям, разрушающим их бизнес и жизнь, такое сравнение представляется вполне уместным. Несколько раз проект подвергался существенным переделкам и, наконец, был одобрен советом министров Италии в 2001 г. Работы по проекту начались в 2003 г. Предусматривалось размещение в проливах четырех мобильных барьеров: двух в Лидо и по одному — в Маламокко и Кьоджа. Барьеры представляют собой 78 подвижных затворов, которые поднимаются во время прилива, чтобы создать временную плотину. Процесс строительства сопровождался перерасходом средств, коррупцией и противодействием со стороны экологических и природоохранных организаций. MOSE уже стоит 6.4 млрд долл. (5.5 млрд евро) и, вероятно, достигнет 8 млрд долл. (7 млрд евро) к моменту полного завершения проекта в декабре 2021 г.

В 2011 г. в Арсенале, символе торговой и военной мощи Венеции, начал работать Центр управления MOSE, использующий передовые технологии для прогнозирования наводнений, моделирования последствий маневров ворот. Первые испытания MOSE успешно проведены 10 июля 2020 г. А 3 октября 2020 г. MOSE впервые показал себя в “деле”. У Пунте-делла-Салюте прогнозировался уровень 130 см, что значительно ниже разрушительных 187 см в ноябре 2019 г., но достаточно, чтобы затопить низменные районы. К 10 ч 10 мин утра 3 октября были подняты все 78 подвижных затворов в трех проливах между Венецианской лагуной и морем. Лагуна была полностью отрезана от моря. В 10 ч 35 мин (максимум прилива) за пределами лагуны был зафиксирован уровень 120 см, а у Пунта-делла-Салюте – 71 см. Несмотря на проливной дождь, наводнение удалось предотвратить и площадь Сан-Марко оказалась незатопленной!

Завершение строительства MOSE намечено на 2021 г., но все понимают, что MOSE в будущем окончательно не решит проблему.

Критики проекта заявляют, что конструкция ворот основана на устаревших прогнозах изменения уровня моря, что разработчики MOSE не учитывали просадку грунта и повышение уровня воды, связанное с продолжительными дождями и ветрами, и что если в течение XXI в. уровень поднимется больше, чем на 32 см, MOSE нужно будет заменить на водонепроницаемые ворота. Сторонники MOSE, наоборот, считают, что ворота и в будущем будут эффективной преградой наводнениям, что больше нет необходимости рассматривать фактор просадки грунта, так как она практически закончилась в 1970-х гг., что использованный при разработке проекта сценарий повышения уровня моря был основан на недавних исследованиях и что барьеры рассчитаны на подъем уровня от 30 до 50 см.

Подробный анализ, изложенный в [29], показывает, что интенсивность повышения уровня моря так или иначе приведет к увеличению числа некогда исключительных наводнений, потребуются еще и более частое использование (закрытие) барьеров MOSE. В итоге уменьшится водообмен лагуны с морем, что приведет к негативным последствиям для экосистемы всей лагуны. Сейчас во время сизигийных приливов через проходы в лагуну поступает  $\sim 20000 \text{ м}^3/\text{с}$  (для сравнения: среднемноголетний расход воды р. По составляет  $1510 \text{ м}^3/\text{с}$  [2]).

## ВЫВОДЫ

Штормовые нагоны в Венецианской лагуне возникают, как правило, при сочетании нескольких факторов: 1) образования области низкого

давления над средиземноморским регионом; 2) возникновения устойчивого и сильного юго-восточного ветра – сирокко (иногда в столкновении с северо-восточным ветром – борой); сирокко дует вдоль главной оси Адриатического моря и стремительно нагнетает воду в Венецианскую лагуна; 3) максимума астрономического прилива. Пик штормовых нагонов в Венецианской лагуне обычно приходится на ноябрь и декабрь [5, 23]. В XX и XXI вв. два случая катастрофической “аква альта” пришлось именно на ноябрь 1966 и 2019 гг. Часто штормовой нагон совпадает с сейшевыми колебаниями в Адриатическом море, образованию которых способствует длинная и узкая конфигурация Адриатического моря и период которых близок к периодам прилива.

За последние полвека частота штормовых нагонов в лагуне увеличилась [10]: если в 1872–1955 гг. они случались в среднем один раз в два года, то в 1955–2010 гг. – по четыре раза в год. Это вызвано влиянием антропогенной просадки грунта в результате откачки природного газа и грунтовых вод в венецианском регионе (особенно интенсивной с 1930 по 1970 г.), углублением судовой каналы Маламокко–Маргера и проходов между барьерными баррами и изменением вследствие этого водообмена с Адриатическим морем.

“Аква альта” наступает, когда уровень моря превышает 80 см относительно нуля поста Пунта-делла-Салюте. Наводнения, вызванные штормовыми нагонами, классифицируются как исключительные, когда уровень у Пунта-делла-Салюте превышает 120 см (этого достаточно, чтобы затопить половину города). Исключительные штормовые нагоны случались с 1872 по 1950 г. один раз (16 апреля 1936 г.); с 1951 по 2000 г. – девять раз; с 2001 по 2019 г. – 12 раз. Пока писалась настоящая статья, вечером 8 декабря 2020 г. в Венеции вновь был зафиксирован исключительный уровень – 138 см. На следующие дни прогнозировался уровень до 145 см, но дальнейшее повышение удалось предотвратить, подняв затворы MOSE.

Увеличение случаев “аква альта” в Венецианской лагуне в начале XXI в. – следствие и показатель изменения климата, в частности повышения уровня Мирового океана. Начиная с середины XX в. во многих регионах мира активизировалась циклоническая деятельность, вызванная увеличением температурных контрастов как над океанами, так и над сушей. Возросла частота и сила штормовых нагонов в прибрежных областях, в том числе и в устьях рек. Именно в этот период отмечены экстремальные штормовые нагоны с катастрофическими последствиями в устьях Рейна, Темзы, Эльбы, Миссисипи, Иравади, Ганга и Брахмапутры, Гоавари, Красной и др.

Уникальный опыт гидрологических исследований в Венецианской лагуне может быть ис-

пользован в России при оценке воздействия прогнозируемых в XXI в. изменений морских факторов на прибрежные регионы и устьевые области страны.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Михайлов В.Н., Михайлова М.В. Влияние многолетних изменений морских факторов на устья рек // Водн. ресурсы. 2015. Т. 42. № 4. С. 367–379.
2. Михайлова М.В. Гидрологический режим и особенности формирования дельты р. По // Водн. ресурсы. 2002. Т. 29. № 4. С. 405–415.
3. Battistin D., Canestrelli P. 1872–2004. La serie storica delle maree a Venezia. Venezia: Istituzione centro previsioni e segnalazioni maree, 2006. 207 p.
4. Brambati A., Carbognin L., Quaia T., Teatini P., Tosi L. The Lagoon of Venice: geological setting, evolution and land subsidence // Episodes. 2003. V. 26. № 3. P. 264–268.
5. Camuffo D. Analysis of the Sea Surges at Venice from A.D. 782 to 1990 // Theor. Appl. Climatol. 1993. № 47. P. 1–14.
6. Camuffo D., Bertolin Ch., Schenal P. A novel proxy and the sea level rise in Venice, Italy, from 1350 to 2014 // Climatic Change. 2017. № 143. P. 73–86.
7. Camuffo D., Bertolin C., Schenal P., Craievich A., Granziere R. The Little Ice Age in Italy from documentary proxies and early instrumental records // Méditerranée. 2014. № 122. P. 17–30.
8. Camuffo D., Sturaro G. Sixty-cm submersion of Venice discovered thanks to Canaletto's paintings // Climate Change. 2003. V. 58. Iss. 3. P. 333–343.
9. Canestrelli P., Mandich M., Pirazzoli P.A., Tomasin A. Venti, depressioni e sesse: perturbazioni delle maree a Venezia (1951–2000). Venezia: Centro Previsioni e Segnalazioni Maree, 2001. 110 p.
10. Carbognin L., Teatini P., Tosi L. Land subsidence in the Venetian area: known and recent aspects // Giornale di Geologia Applicata. 2005. № 1. P. 5–11.
11. Cavaleri L., Bajo M., Barbariol F., Bastianini M., Benetazzo A., Bertotti L., Chiggiato J., Ferrarin C., Trincardi F., Umgiesser G. The 2019 Flooding of Venice and its implications for future predictions // Oceanography. V. 33. № 1. P. 42–49.
12. Comerlati A., Ferronato M., Gambolati G., Putti M., Teatini P. Saving Venice by seawater // J. Geophys. Res. 2004. V. 109. P. 1–14.
13. Enzi S., Camuffo D. Documentary Sources of the Sea Surges in Venice from AD 787 to 1867 // Natural Hazards. 1995. № 12. P. 225–287.
14. Ghetti A., Batisse M. The overall protection of Venice and its lagoon // Nature and Resour. 1983. V. XIX. № 4. P. 7–19.
15. <https://oubliettemagazine.com/2019/11/24/la-storia-dellacqua-alta-a-venezia-e-la-gestione-idraulica-della-laguna-ai-tempi-della-serenissima-repubblica>
16. <https://www.comune.venezia.it/content/centro-previsioni-e-segnalazioni-maree>
17. <https://www.comune.venezia.it/it/content/le-acquae-alte-eccezionali>
18. <https://www.mosevenezia.eu>
19. <https://www.venezia.isprambiente.it>
20. IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2013. 1535 p.
21. Klein M., Lichter M., Zviely D. Recent sea-level changes along Israeli and Mediterranean coasts // Horizons Contemporary Israeli Geography. 2004. Special Iss. 60–61. P. 247–254.
22. Molinaroli E., Guerzoni S., Sarretta A., Cucco A., Umgiesser G. Links between hydrology and sedimentology in the Lagoon of Venice, Italy // J. Mar. Systems. 2007. V. 68. Iss. 3–4. P. 303–317.
23. Orlic M., Kuzmic M., Pasarić Z. Response of the Adriatic Sea to the bora and sirocco forcing // Continental Shelf Res. 1994. V. 14. № 1. P. 91–116.
24. Parker A., Ollier C.D. Venice: Rising Water or Sinking Land? // Nonlinear Engineering. 2015. № 4 (3) P. 161–174.
25. Pirazzoli P.A. Possible defenses against a sea-level rise in the Venice area, Italy // J. Coast Res. 1991. V. 7. № 1. P. 231–248.
26. Pirazzoli P.A. Recent sea-level changes and related engineering problems in the Lagoon of Venice (Italy) // Progress in Oceanography. 1987. V. 18. Iss. 1–4. P. 323–346.
27. Raicich F. Long-term variability of storm surge frequency in the Venice Lagoon: an update thanks to 18th century sea level observations // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2015. № 15. P. 527–535.
28. Ravera O. The Lagoon of Venice: the result of both natural factors and human influence // J. Limnol. 2000. V. 59. № 1. P. 19–30.
29. Umgiesser G. The impact of operating the mobile barriers in Venice (MOSE) under climate change // J. Nature Conservation. 2020. V. 54. P. 1–10.
30. Zanchettin D., Bruni S., Raicich F., Lionello P., Adloff F., Androsov A., Antonioli F., Artale V., Carminati E., Ferrarin C., Fofonova V., Nicholls R.J., Rubinetti S., Rubino A., Sannino G., Spada G., Thiéblemont R., Tsimplis M., Umgiesser G., Vignudelli S., Wöppelmann G., Zerbini S. Review article: Sea-level rise in Venice: historic and future trends // Nat. Hazards Earth System Sci. 2020. <https://doi.org/10.5194/nhess-2020-351>