

УДК 551.465.75
DOI: 10.7868/S25000640210303

РЕКОНСТРУКЦИЯ ОПАСНЫХ НАГОНОВ В СЕВЕРНОМ КАСПИИ НА ОСНОВЕ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ РЕЛЬЕФА ДНА И ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

© 2021 г. Н.А. Яицкая¹, И.В. Шeverdyaev^{1,2}, А.А. Магаева^{2,3}, В.С. Бригида¹

Аннотация. Представлены результаты работ по реконструкции опасных нагонов в дельте Волги и Северном Каспии с использованием инструментов гидрологического моделирования. Для расчетов разработаны высокоточные цифровые модели дельты Волги и Северного Каспия на основе топографических и гидрографических карт. Контроль осуществлялся в ручном режиме. Для учета особенностей строения русел разработан специальный алгоритм, описанный в статье. Выполнена верификация модели HEC-RAS по ряду гидрологических сценариев при разных вариантах коэффициента шероховатости. При расчетах учтено перераспределение стока Волги по рукавам, предложены оптимальные точки задания речных расходов и уровня. Для реконструкции выбор опасных нагонов в XX–XXI веках осуществлялся на основе отдельных сведений из научной литературы и по данным речных уровнемеров. Всего выделено 26 случаев, для которых выполнены расчеты. Построены карты максимального затопления для каждого случая. Определены некоторые особенности затопления дельты Волги. Помимо колебаний уровня в северной части Каспийского моря на площадь затопления существенное влияние оказывает расход в р. Волге – чем больше расход воды в реке, тем больше площадь затопления при нагонных явлениях схожей динамики. Максимальная площадь затопления характерна для нагона в 1991 г. – 17,5 тыс. км² в условиях повышенного речного стока в период половодья, минимальная – для 1940-х и 1960-х гг. (менее 10 тыс. км²), когда выделялись нагоны с максимальным уровнем ниже –27 мБС.

Ключевые слова: цифровая модель рельефа дна, цифровая модель местности, географическая информационная система, численное моделирование, Каспийское море, Волга.

RECONSTRUCTION OF DANGEROUS SURGES IN THE NORTHERN CASPIAN BASED ON DIGITAL ELEVATION MODELS AND HYDROLOGICAL MODELING

N.A. Yaitskaya¹, I.V. Sheverdyaev^{1,2}, A.A. Magaeva^{2,3}, V.S. Brigida¹

Abstract. The results of reconstruction of dangerous surges in the Volga delta and the Northern Caspian Sea using hydrological modeling tools are presented in the article. High-precision digital models of the Volga delta and Northern Caspian Sea have been developed based on topographic and hydrographic maps. The control was carried out in manual mode. The special algorithm described in the article was developed to take into account the peculiarities of the structure of the channels. The HEC-RAS model has been verified for a number of hydrological scenarios with different variants of the roughness coefficient. The redistribution of the Volga runoff along the branches was taken into account in the calculations, the optimal points for setting the river flow rates and level were proposed. For reconstruction, the choice of dangerous surges in the 20th and 21st centuries was carried out on the basis of information from the scientific literature and according to the data of river

¹ Федеральный исследовательский центр Субтропический научный центр Российской академии наук (Federal Research Centre the Subtropical Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Sochi, Russian Federation), Российская Федерация, 354002, г. Сочи, ул. Яна Фабрициуса, 2/28, e-mail: yaitskayan@gmail.com

² Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук (Federal Research Centre the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russian Federation), Российская Федерация, 344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41

³ Южный федеральный университет (Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russian Federation), Российская Федерация, 344006, г. Ростов-на-Дону, ул. Большая Садовая, 105/42

level gauges. A total of 26 cases were identified for which calculations were performed. Maximum flooding maps for each case are built. Some features of the Volga delta flooding have been identified. In addition to level fluctuations in the northern part of the Caspian Sea, the inundation area is significantly affected by the discharge in the river Volga – the greater the river discharge – the larger is the flooded area during surges of similar dynamics. The maximum flooded area was 17.5 thousand km² for the surge in 1991, at the annual flood runoff, the minimum – for the 1940s and 1960s (less than 10 thousand km²), when surges with the maximum level below –27 meters were identified.

Keywords: digital elevation model, digital terrain model, geographic information system, numerical modeling, Caspian Sea, Volga River.

ВВЕДЕНИЕ

Каспийское море – крупнейший в мире замкнутый бессточный водоем, характерной особенностью которого являются значительные периодические колебания уровня. Вместе с обширной дельтой р. Волги, которая является самой большой речной дельтой в Европе, водоем образует уникальный природный комплекс. Флора и фауна дельты с 1919 г., с момента образования Астраханского заповедника, находятся под охраной государства. В 1976 г. дельта Волги включена в перечень водно-болотных угодий международного значения, подпадающих под действие Рамсарской конвенции.

Большая часть устьевая взморья Волги представляет собой обширный мелководный район шириной до 200 км и длиной 30–35 км с глубинами менее 1 м, значительно заросший водной растительностью. Остальная часть взморья длиной 15–20 км имеет глубины от 1 до 10 м. Географически дельта Волги начинается в месте отделения от русла рукава Бузан (севернее Астрахани) и насчитывает до 500 рукавов, протоков, мелких речек и ериков. Основные рукава дельты – Бузан, Бахтемир, Камызяк, Старая Волга, Болда, Ахтуба, Кигач. Они образуют системы более мелких водотоков (шириной до 30–40 м и расходом воды менее 50 м³/с), составляющих основу русловой сети и прорезающих морской край дельты. Вследствие общего снижения уровня Каспийского моря в XX–XXI веках площадь дельты за последние 130 лет выросла в 9 раз. Периодическое затопление дельты Волги в результате ветровых нагонов является особенностью гидрологического режима, которую надо принимать во внимание при осуществлении и планировании хозяйственной и природоохранной деятельности.

При всей изученности моря и дельтового участка реки, большом количестве опубликованных работ [1–4] удивительным фактом является то, что на се-

годняшний день в свободном доступе отсутствуют картографические материалы с результатами топографических и эхолотных съемок, отражающие современное состояние глубин и береговой линии Каспийского моря. А в XXI веке, веке активного развития информационных технологий и методов аэро- и спутникового мониторинга, данная проблема воспринимается наиболее остро. В литературе используются устаревшие (в основном по состоянию на 1980-е гг.) данные о глубинах и положении береговой линии. Развитие методов имитационного моделирования [5–7] позволяет выполнять эксперименты по расчету воздействия штормов и нагонов на обширные мелководья Северного Каспия и дельты Волги, площадей затопления дельты реки и взморья для условных и реальных значений уровня моря и речного стока с учетом уклона дельты, типа подстилающей поверхности, свойств грунтов, околородной растительности, а также наличия и характеристик гидротехнических сооружений на реках. Важным условием получения качественного результата при этом является точная и актуальная (соответствующая действительному уровню Каспийского моря) цифровая модель рельефа (ЦМР) объекта исследования. Существующие в открытом доступе ЦМР с пространственным разрешением не менее 30 м/пиксел, основанные на обработке радарной спутниковой съемки, не позволяют выполнять детальные исследования для обширных низменных территорий. В связи с этим целью настоящей работы стало создание актуальной высокоточной цифровой модели рельефа дна Каспийского моря и дельты Волги на основе серии разномасштабных карт и реконструкция опасных нагонов в XX–XXI веках на основе полученной ЦМР.

Для дельты Волги характерны колебания уровня воды до 4–5 м, приводящие к затоплению значительных площадей вследствие характерной для речных дельт выположенности поверхности суши.

Причинами столь крупных колебаний речных уровней здесь могут быть колебания речного стока Волги и сгонно-нагонные процессы в Северном Каспии, вызванные ветрами южного и юго-восточного направлений с постоянной скоростью более 10 м/с на протяжении нескольких часов. Исследование процессов затопления, взаимовлияния их причин в XX–XXI веках возможно проводить на основе анализа наблюдавшихся случаев, реконструированных с помощью гидрологического моделирования. В последние 30 лет современные представления о механизмах гидрологических процессов формализованы в виде инструментов моделирования. Однако достоверность расчетных результатов сильно зависит от ряда параметров, характеризующих природные особенности конкретных участков. Для дельты Волги, как и для любой другой, такими параметрами являются цифровая модель рельефа или местности, а также распределение коэффициента шероховатости поверхности.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Исходные данные и построение цифровых моделей рельефа. Для создания ЦМР дна Каспийского моря использована информация, накопленная в геоинформационной системе [8–9]: карты масштаба 1 : 750000, 1 : 200000, 1 : 100000, составленные и опубликованные в 1992–2009 гг. Управлением навигации и океанографии Министерства обороны РФ (рис. 1) и соответствующие среднему положению уровня моря –27 м.

Для создания ЦМР дельты Волги использованы следующие материалы:

- топографические карты ФГУП «Госгисцентр» (1 : 25000) [10];
- топографические карты Генштаба СССР (1 : 100000) [11];
- карты глубин судоходного пути Волги (ЕГСЕТР) [12];

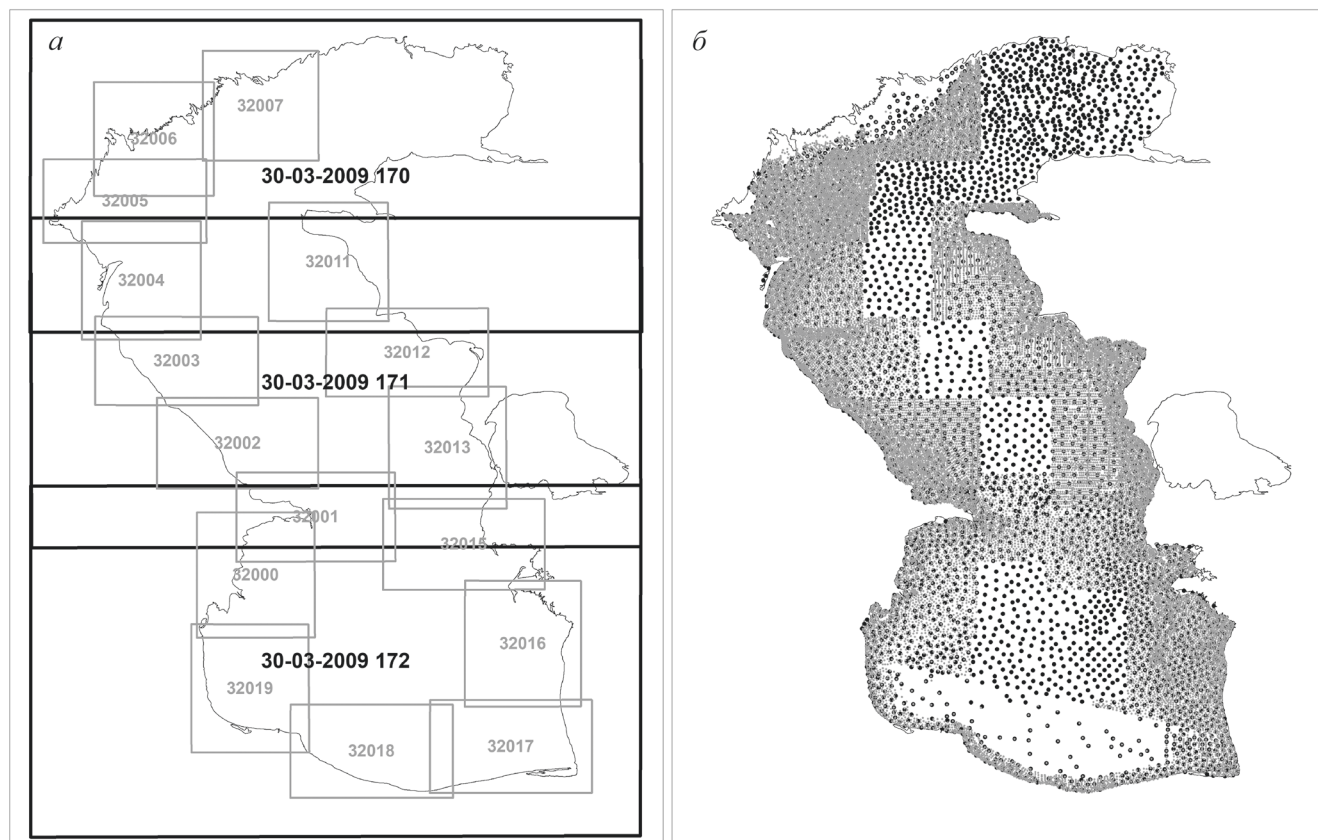


Рис. 1. Пространственное покрытие акватории Каспийского моря гидрографическими картами с указанием номеров (а) и векторизованные точки глубин (б). Темно-серым цветом обозначены карты масштаба 1 : 750000 (а) и оцифрованные по этим картам точки глубин (б), светло-серым – 1 : 200000, 1 : 100000 (а) и оцифрованные точки глубин (б).

Fig. 1. Spatial coverage of the Caspian Sea water area by hydrographic maps indicating numbers (а) and vectorized depth points (б). Maps of scale 1 : 750000 (а) and depth points digitized on these maps (б) are marked in dark gray, light gray – 1 : 200000, 1 : 100 000 (а) and digitized depth points (б).

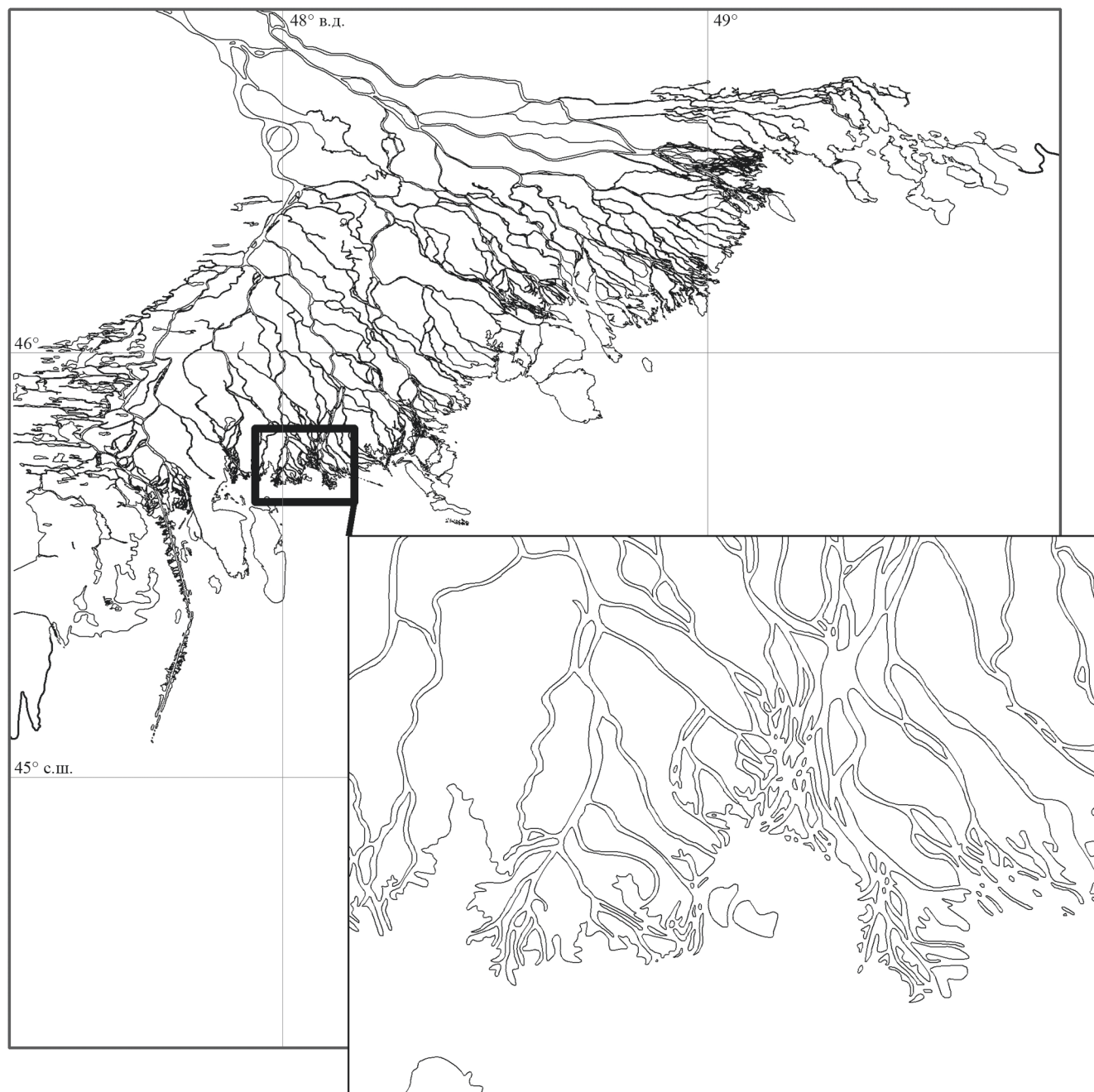


Рис. 2. Векторизованное представление системы речных каналов дельты Волги.

Fig. 2. Vectorized view of the Volga River delta channel system.

– гидрографические карты части Каспийского моря, прилегающей к дельте Волги (морская навигационная карта № 32006, масштаб 1 : 200000) [13].

Для гидрографических карт выполнена географическая привязка по координатной сетке и далее векторизация. Всего оцифровано около 30000 отметок глубин и основных изобат (5 м, 10 м, 20 м, 50 м, 100 м, ..., 1000 м). Работы выполнялись вручную, так как на картах круп-

ного масштаба плотность точек очень высокая и при автоматической трассировке могли возникнуть ошибки с интерпретацией десятичных значений глубин. Далее с помощью стандартных инструментов географической информационной системы построена цифровая модель рельефа дна моря.

В отличие от ЦМР дна Каспийского моря ЦМР дельты Волги должна отражать разветвленную гидрографическую сеть, которая представляет мно-

жество русел, транспортирующих речные воды в море. Это составляет дополнительную сложность при создании ЦМР.

Для построения ЦМР использован инструмент Topo to Raster ArcGIS10 (основан на программе ANUDEM 5.3 [14]), позволяющий на основе массива точечных, линейных и полигональных объектов интерполировать значения высоты в каждой ячейке полученного растра. Важной особенностью данного инструмента является то, что интерполируются как точечные значения, так и линейные (горизонталы, линии обрывов) и полигональные (озёра представляются плоскостями равного превышения) объекты. Однако прямое использование такого подхода для построения ЦМР дельты Волги некорректно, поскольку не будут учитываться речные русла гидрографической сети. Для постоянных водотоков с точки зрения геоморфологии характерно особое строение поперечного профиля.

В связи с вышеизложенным методика построения ЦМР дельты Волги включала следующие этапы:

- создание ЦМР суши;
- создание ЦМР гидрографической сети;
- создание ЦМР придельтовой части Каспийского моря;
- объединение составленных ранее ЦМР в композитную для дельты Волги.

ЦМР суши была построена на основе информации о рельефе поверхности, указанной на топографических картах, – точках высот, горизонталях, обрывах, линиях стрежених природных водотоков. Для построения ЦМР гидрографической сети использовались полигоны русел, линии гидрографической сети (рис. 2), а также отметки высот урезов топографических карт. Отметки глубин, изобаты крупных русел и линии стрежени были интерполированы в растр распределения глубин в пределах

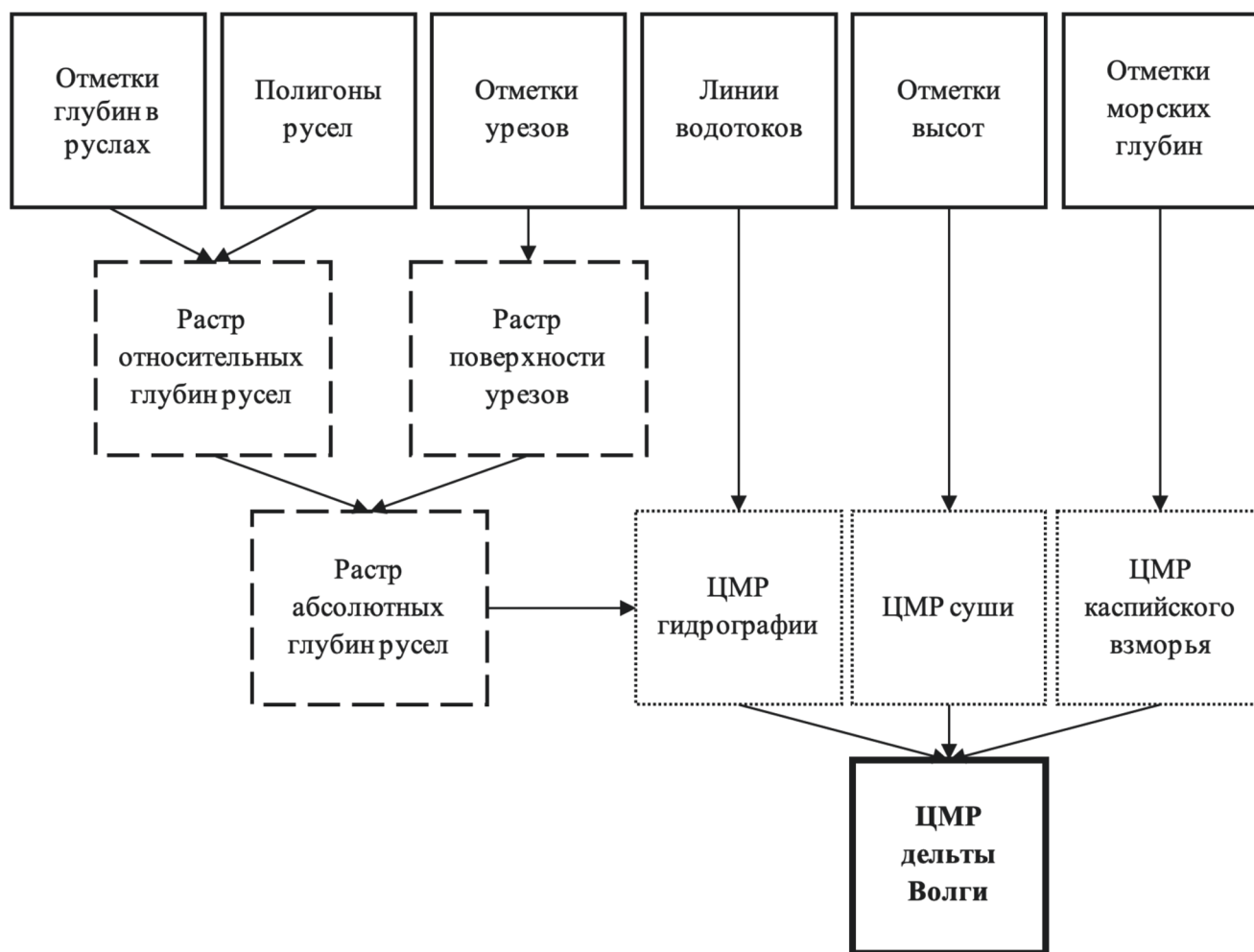


Рис. 3. Алгоритм построения ЦМР дельты Волги.

Fig. 3. Algorithm of the Volga River delta DEM construction.

полигонов речных русел. Значения отметок высот урезов были интерполированы в растр, отражающий наклонную плоскость урезов гидрографической сети дельты Волги. Линии гидрографической сети были преобразованы в растр со значениями глубины на основе указанных на топографических картах глубин либо, при их отсутствии, задавалось значение «1». Далее от значений раstra наклонной поверхности были отняты значения раstra распределения глубин и раstra линейной гидрографической сети. В результате был получен растр ЦМР гидрографической сети дельты Волги.

ЦМР придельтовой части Каспийского моря создавался на основе листов 32006 и 32007 гидрографических карт с помощью интерполяции значений отметок глубин и линии берега. Полученные ЦМР были объединены в ЦМР дельты Волги (рис. 3) таким образом, чтобы ЦМР суши и ЦМР придельтовой части Каспийского моря смыкались между собой вдоль береговой линии, а значения высоты ЦМР суши заменялись на значения высоты ЦМР гидрографической сети при их наличии (рис. 4).

Проверка готовых ЦМР Каспийского моря и дельты Волги выполнена в ручном и полуавтоматическом режимах:

1 шаг – последовательный визуальный контроль полученных значений отметок глубин и исправление неточностей;

2 шаг – построение «черновых» GRID- и TIN-моделей, которые классифицировались по значениям, при этом выбиралась наиболее контрастная раскраска и уже визуально просматривались «пятна» выбросов.

Размер ячейки раstra итоговой цифровой модели рельефа дна Каспийского моря составил $0,001^\circ \times 0,001^\circ$ по широте и долготе соответственно.

Гидрологическая модель дельты Волги. Реконструкция опасных нагонов выполнена на основе адаптированной гидрологической модели HEC-RAS. Размер ячейки расчетной сетки составил 500×500 м. Общая площадь расчетов – 13 тыс. км² (более 101000 ячеек) (рис. 5). Вся расчетная область ограничена с юга изобатой 3 м в Северном Каспии, с севера – районом сразу после отделения от Волги р. Бузан. Расход задан на верхней границе в два русла с соотношением 2 : 1 (для Волги и Бузана соответственно), что соответствует среднеголетним значениям. Суточный ход уровня воды задан на нижней границе, находящейся в Каспийском море.

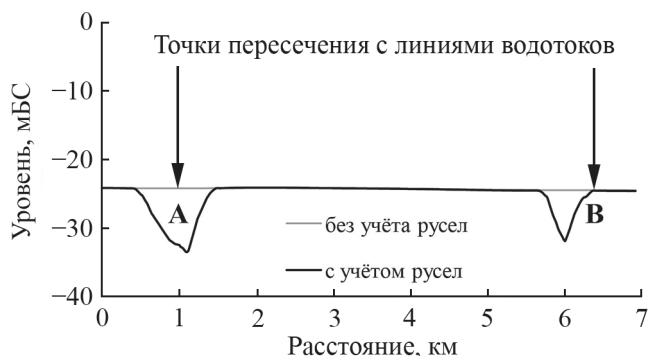


Рис. 4. Поперечный профиль участка дельты Волги без учета ЦМР русел и в результате использованной методики.

Fig. 4. Transverse profile of the Volga River delta section without taking into account the DEM of the channels and as a result of the method used.

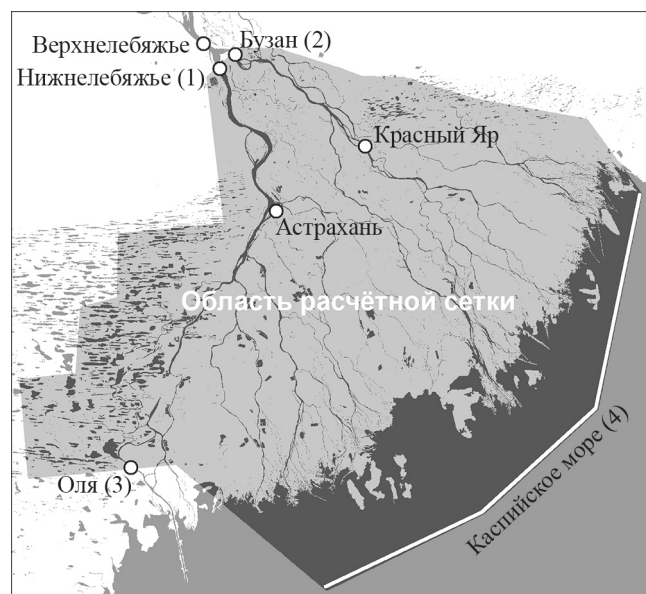


Рис. 5. Расчетная область, наложенная на растр русел дельты Волги: (1)–(2) – точки задания речного стока; (3) – точка задания уровня; (4) – линия задания уровня.

Fig. 5. The computational area superimposed to the raster of the Volga delta channels: (1)–(2) – the points of setting the river flow; (3) – the point of setting the sea level; (4) – the line of setting the sea level.

Верификация модели выполнена для среднеголетних условий речного стока. В результате были определены параметры шероховатости, при которых расчетные значения наиболее приближены к наблюдениям на уровнемерах. Шероховатость подстилающей поверхности отражает коэффициент Маннинга. Низкие значения коэффициента приводят к увеличению скорости потока, а значит, к более низким уровням воды при том же расходе. Высокие значения, напротив, приводят к падению

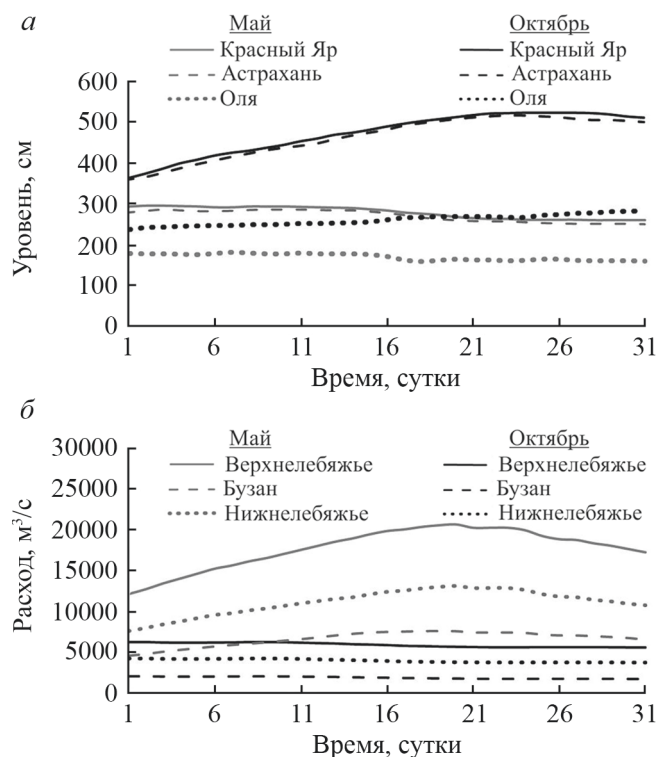


Рис. 6. Суточные наблюдения в мае и октябре 2017 г.: *a* – данные уровнемеров; *b* – данные расходов р. Волга в с. Верхнелебязьем, пос. Бузан и расчетные в с. Нижнелебязьем.

Fig. 6. Daily observations in May and October 2017: *a* – data of level gauges; *b* – experimental data on the Volga River cost in Verkhnelebyazhye, Buzan and calculation data in Nizhnelebyazhye.

скорости потока, повышению уровня воды, и, как следствие, выходу ее из берегов русел.

Для исследования коэффициента шероховатости были использованы следующие материалы:

- ЦМР дельты Волги;
- суточные наблюдения уровнемеров в пунктах Астрахань, Оля, Красный Яр [15];
- суточные наблюдения расходов в пунктах Верхнелебязье (р. Волга) и Бузан (р. Бузан) [15].

Были установлены 4 границы (рис. 5), для которых задавались суточные наблюдения: для стока Волги – в пределах русел у с. Нижнелебязье (1) и пос. Бузан (2), для наблюдений колебания уровня

воды – в русле протоки Бахтемир у с. Оля (3) и на границе расчетной сетки в Каспийском море (4). Так как суточные наблюдения за расходом Волги доступны для с. Верхнелебязье (выше ответвления от Волги р. Бузан) и для пос. Бузан (соответственно, ниже), то для с. Нижнелебязье они были пересчитаны как наблюдения в с. Верхнелебязьем за вычетом наблюдения в пос. Бузан.

Расчеты зон затопления при наблюдавшихся расходах и уровнях осуществляли для мая и октября 2017 г. – половодного и меженного месяцев (рис. 6).

Таким образом, были рассчитаны пары сценариев с одинаковым распределением шероховатости. Шероховатость поверхности распределялась на два класса: русла протоков и нерусловые поверхности (суша). Предполагается, что русла протоков из-за регулярной проточности обладают пониженной шероховатостью, а поверхность суши, напротив, повышенной вследствие характерной для дельты Волги тростниковой растительности (табл. 1). Для контрольной пары сценариев задана одинаковая шероховатость для обоих классов – 0,0125 (пары коэффициентов подобраны исходя из представления о нахождении дельт Волги и Дона в схожих климатических условиях по работе [16]).

Выбор оптимального варианта распределения шероховатости проведен на основе сравнения модельного колебания уровней в Астрахани и в Красном Яре с зарегистрированным для соответствующих месяцев. На рисунке 7 показано сравнение результатов расчетных сценариев с наблюдениями в Астрахани в мае 2017 г.

Контрольный сценарий, соответствующий шероховатости 0,0125 и для русел, и для суши не воспроизводит наблюдаемый рост уровня в Астрахани. Это происходит вследствие быстрого стекания воды как в русле, так и по поверхности суши. Даже небольшое повышение коэффициента шероховатости для суши приводит к более значительному росту уровня, как показывают сценарии 4 и 2. Сценарии 1 и 3, для которых шероховатость суши составила 0,2, воспроизводят зарегистрированную динамику уровня. Нами было выбрано сочетание шероховатости сценария 3 вследствие того, что при таких условиях уровень, сформированный речным стоком перед нагоном, ближе к наблюдавшимся значениям (рис. 7б). На рисунке 8 представлены площади затопления прибрежных территорий в районе г. Астрахань при минимальном, максимальном и наиболее вероятном расходе р. Волги.

Таблица 1. Расчетные распределения шероховатости по классам
Table 1. Calculated roughness distributions by class

Сценарий Scenario	Русла Riverbeds	Суша Not riverbeds
Контрольный / Control	0,0125	0,0125
1	0,01	0,2
2	0,0125	0,1
3	0,007	0,2
4	0,0125	0,05

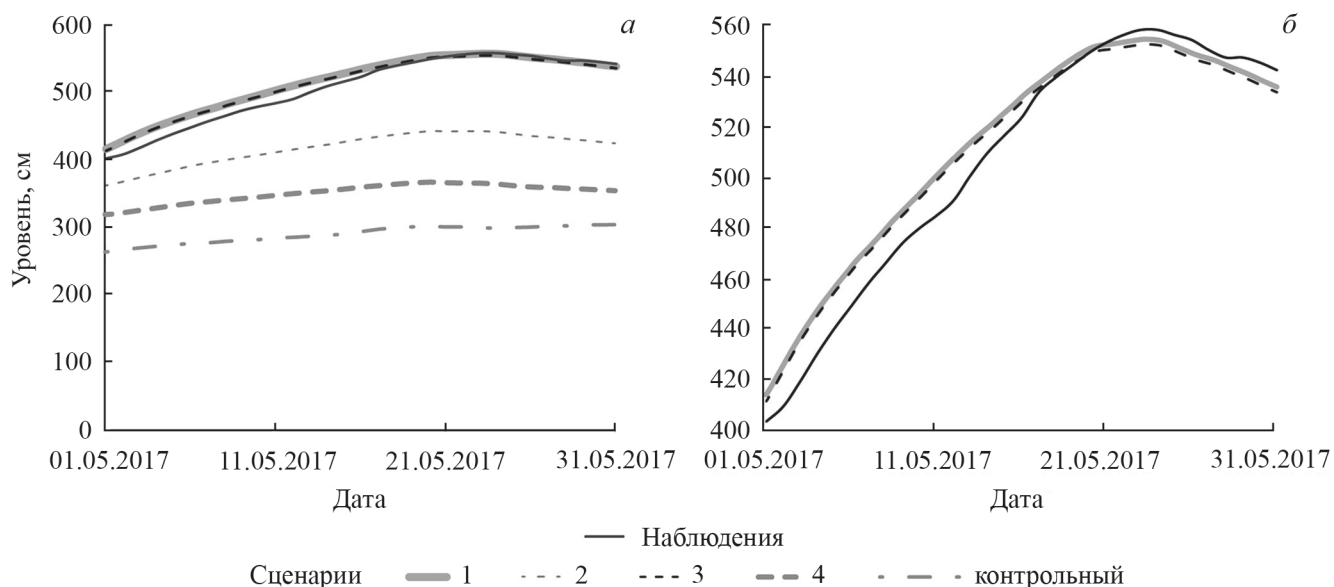


Рис. 7. Сравнение результатов тестовых расчетов по разным сценариям (табл. 1) с наблюдениями по уровнемеру в Астрахани: *а* – результаты для всех сценариев в сравнении с наблюдениями; *б* – сценарии 1, 3 и наблюдения, м³/с.

Fig. 7. Comparison of the test calculations results for different scenarios (Table 1) with observations from the Astrakhan level gauge: *a* – results for all scenarios in comparison with observations; *b* – scenarios 1, 3 and observations, m³/s.

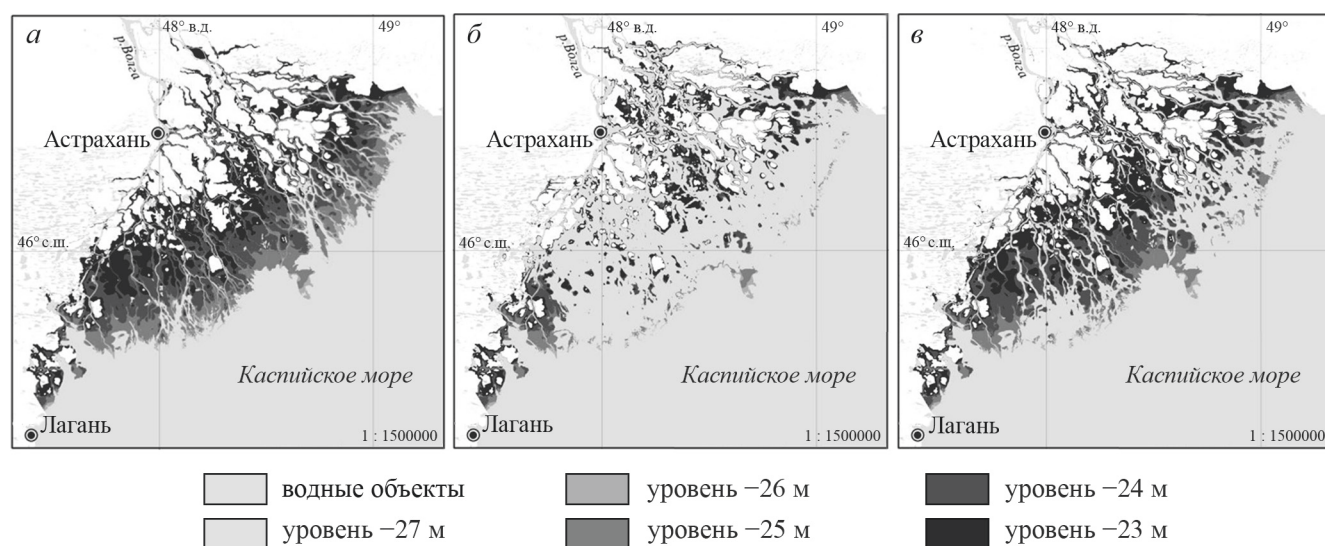


Рис. 8. Пространственное распределение степени затопления дельты р. Волга: *а* – при значении расхода реки 2000 м³/с; *б* – 17000 м³/с; *в* – 7250 м³/с.

Fig. 8. Spatial distribution of the flooding area in the Volga River delta: *a* – with a river runoff 2000 m³/s; *b* – 17000 m³/s; *v* – 7250 m³/s.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для реконструкции исторических нагонов в дельте Волги использовались суточные наблюдения уровня в ближайших к дельте уровнемерах в Каспийском море: на о. Искусственный, на о. Тюлений и в г. Лагань. Кроме этого, для учета речного расхода привлекались месячные расходы в с. Верхнелебяжьем в 1938–2017 гг. В качестве реконстру-

ируемых по литературным данным было выделено и сопоставлено с показаниями уровнемеров 26 случаев нагонов с 1939 по 2003 г. (табл. 2).

При сравнении площадей водного зеркала выбранных нагонов с максимальными уровнями и речными расходами можно выделить нагон 23.06.1991, когда несмотря на чрезвычайно низкий расход воды в Волге наблюдался наивысший уровень, что привело к максимальной площади

водного зеркала – 17,5 тыс. км². Минимальные площади водного зеркала (менее 10 тыс. км²) характерны для нагонов 1960-х и 1970-х гг., когда выделялись нагоны с максимальным уровнем ниже –27 мБС. Кроме непосредственно колебания уровня в северной части Каспийского моря на площади водного зеркала влияют также и расходы в Волге: например, если сравнить нагоны 23.03.1939 и 13.11.1952, когда соответствующие уровни были –25,53 и –25,57 м (то есть разница 4 см, почти идентичные), а расходы 2120 и 7920 м³/с, во втором случае площадь была на 3 тыс. км² больше.

Распределение затопленных площадей в дельте Волги для каждого рассмотренного нагона представлено на рисунке 9.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Реконструкция опасных нагонов в Северном Каспии выполнена на основе методов геоинформационных технологий и комплекса гидрологических моделей. Разработана высокоточная цифровая модель рельефа дна Северного Каспия и дельты Волги, а также цифровая модель

Таблица 2. Реконструируемые нагоны по литературным данным [17–19]
Table 2. Reconstructed surges according to the literature data [17–19]

№	Дата Date	Пункт Location	Уровень нагона, см Surge level, cm	Абсолютный уровень, м Absolute level, m
1	23.03.1939	Лагань / Lagan	208	–25,53
2	20.11.1939	Лагань / Lagan	184	–26,15
3	16.01.1941	о. Тюлений / Tyuleny Island	120	–26,92
4	05.10.1944	о. Искусственный / Iskusstvennyy Island	116	–26,24
5	30.11.1944	Лагань / Lagan	229	–25,91
6	07.03.1944	Лагань / Lagan	189	–26,25
7	12.11.1952	о. Тюлений / Tyuleny Island	238	–25,54
7	13.11.1952	о. Искусственный / Iskusstvennyy Island	214	–25,57
7	13.11.1952	Лагань / Lagan	400	
8	03.09.1966	о. Тюлений / Tyuleny Island	116	–27,1
9	02.03.1967	о. Тюлений / Tyuleny Island	114	–27,34
10	07.11.1979	о. Тюлений / Tyuleny Island	138	–27,45
10	08.11.1979	Лагань / Lagan	177	–26,4
11	28.03.1980	о. Тюлений / Tyuleny Island	143	–27,31
12	25.12.1980	о. Тюлений / Tyuleny Island	146	–27,23
12	27.12.1980	о. Тюлений / Tyuleny Island	148	–27,32
13	17.02.1981	Лагань / Lagan	263	–26,4
14	17.12.1981	о. Тюлений / Tyuleny Island	146	–26,99
15	28.12.1981	о. Искусственный / Iskusstvennyy Island	116	–26,26
15	28.12.1981	о. Тюлений / Tyuleny Island	140	–26,83
15	28.12.1981	Лагань / Lagan	247	–26,16
16	13.10.1987	о. Искусственный / Iskusstvennyy Island	175	
16	13.10.1987	о. Тюлений / Tyuleny Island	131	
17	29.10.1987	о. Тюлений / Tyuleny Island	127	
18	17.04.1989	о. Искусственный / Iskusstvennyy Island	117	–26,22
18	17.04.1989	о. Тюлений / Tyuleny Island	110	
19	13.12.1990	о. Тюлений / Tyuleny Island	143	
19	14.12.1990	о. Искусственный / Iskusstvennyy Island	115	–25,82
20	23.06.1991	о. Искусственный / Iskusstvennyy Island	156	–25
21	17.10.1992	о. Искусственный / Iskusstvennyy Island	114	–25,87
22	25.10.1994	о. Искусственный / Iskusstvennyy Island	120	–25,23
23	13.03.1995	о. Искусственный / Iskusstvennyy Island	438	–28
23	13.03.1995	о. Тюлений / Tyuleny Island	246	
24	14.10.1998	о. Искусственный / Iskusstvennyy Island	128	–25,59
25	19.03.2000	о. Искусственный / Iskusstvennyy Island	155	–25,9
26	17.11.2003	о. Тюлений / Tyuleny Island	195	

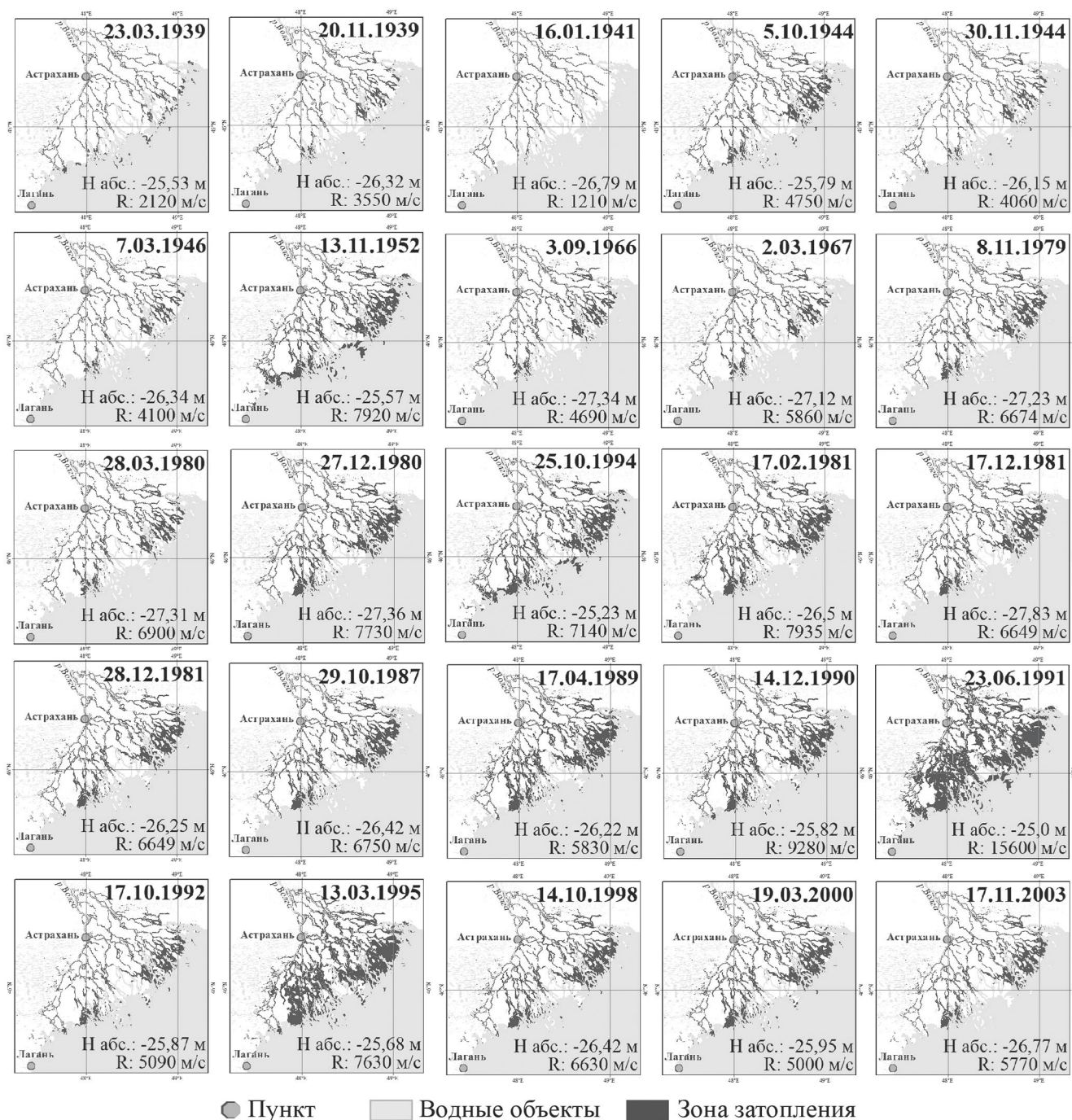


Рис. 9. Зоны затопления дельты Волги для случаев опасных нагонов в XX–XXI веках: Н абс. – уровень моря, м; R – расход Волги в с. Верхнелебязье.

Fig. 9. Flooding areas of the Volga River delta for cases of dangerous surges in the 20th and 21st centuries. Н абс. – sea level, m; R – the Volga River runoff in the Verkhnelebyazhye settlement.

местности на основе современных топографических и гидрографических карт. Предложен специальный алгоритм, позволяющий при построении ЦМР учитывать особенности разветвленной русловой сети дельты Волги. В рамках адаптации гидрологического комплекса HEC-RAS выполнена серия расчетов для разных

сценариев речных расходов и коэффициента шероховатости.

На основе литературных сведений и данных отдельных уровнемеров в XX–XXI веках выделено 26 опасных нагонов, для которых выполнена реконструкция хода уровня при затоплении и площадей затопления в дельте Волги.

Показано, что помимо колебаний уровня в северной части Каспийского моря на площадь затопления существенное влияние оказывает расход в р. Волге – чем больше расход воды в реке, тем больше площадь затопления при нагонных явлениях схожей динамики.

Максимальная площадь затопления характерна для нагона в 1991 г., минимальная – для 1960-х и 1970-х гг. В целом можно говорить об увеличении площадей затопления в дельте Волги при возникновении нагонных явлений.

Представленный в работе метод реконструкции опасных нагонов в Северном Каспии показал свою эффективность и может быть использован для дру-

гих мелководных водоемов с обширными дельтовыми участками, например для дельты Дона.

Построение цифровой модели рельефа дна Каспийского моря и цифровой модели местности выполнено при финансовой поддержке РФФИ и РГО в рамках научного проекта № 17-05-41190 РГО_а. Построение цифровой модели рельефа дна дельты Волги выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-05-80043. Расчет зон затопления выполнен при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках научного проекта № 20-77-00083.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеевский Н.И., Айбулатов Д.Н. 2011. Динамика гидрографической сети и морского края дельты Волги с 1800 по 2010 г. *Вестник Московского университета. Серия 5. География*. 2: 96–102.
- Яицкая Н.А., Глушенко В.В. 2010. Исследование ледовой обстановки Северного Каспия с помощью данных спутникового мониторинга. В кн.: *Материалы III научной конференции «Геоинформационные технологии и космический мониторинг» (8–10 сентября 2010, п. Дюрсо)*. Ростов н/Д, изд-во СКНЦ ВШ: 140–146.
- Бадюкова Е.Н. 2010. История развития Северного Прикаспия и дельты Волги. *Океанология*. 6(50): 1002–1009.
- Балдина Е.А., Лабутина И.А. 2011. Аэрокосмические исследования и картографирование в дельте Волги. *Вестник Московского университета. Серия 5. География*. 2: 78–84.
- Blumberg A.F., Mellor G.L. 1987. A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model. In: *Three-Dimensional Coastal Ocean Models. Vol. 4*. Washington, American Geophysical Union: 1–16. doi: 10.1029/CO004p0001
- Young I.R. 1999. *Wind generated ocean waves, vol. 2*. Kidlington, Elsevier: 288 p.
- Booij N., Ris R.C., Holthuijsen L.H. 1999. A third-generation wave model for coastal regions 1. Model description and validation. *Journal of Geophysical Research*. 104(C4): 7649–7666. doi: 10.1029/98JC02622
- Яицкая Н.А. 2016. Цифровая модель рельефа дна Каспийского моря. В кн.: *«Экология, экономика, информатика»: Сборник статей в 2 томах. Т. 2: Геоинформационные науки и экологическое развитие: новые подходы, методы, технологии. Геоинформационные технологии и космический мониторинг*. Ростов н/Д, изд-во ЮФУ: 211–217.
- Яицкая Н.А. 2018. Создание цифровой модели рельефа дельты Волги. В кн.: *Устойчивое развитие особо охраняемых природных территорий. Том 5: Сборник статей V Всероссийской научно-практической конференции (10–12 октября 2018, Сочи)*. Сочи, изд-во ГКУ КК «Природный орнитологический парк в Имеретинской низменности», Донской издательский центр: 366–369.
- Топографические карты. *Картографический портал ФГУП «ГОСГИСЦЕНТР»* URL: <http://maps.ggc.ru> (дата обращения 17.10.2012).
- Карты генштаба СССР – архив топографических карт. *Топографические карты*. URL: <http://satmaps.info> (дата обращения: 01.07.2020).
- Том 7. Река Волга – от Волгоградского гидроузла до Астрахани. *Атлас единой глубоководной системы Европейской части РФ*. URL: <http://roro.pro/tom-7-reka-volga-ot-volgogradskogo-gidrouzla-do-astraxani> (дата обращения: 22.01.2021).
- 32006 От Астрахани до Астраханского рейда. *Интерактивная морская карта всех районов Мирового океана. Северная часть Каспийского моря*. URL: <https://www.morkniga.ru/r821084-1.html> (дата обращения: 23.01.2021).
- Hutchinson M.F., Xu T., Stein J.A. 2011. Recent progress in the ANUDEM elevation gridding procedure. In: *Geomorphometry 2011 (Redlands, California, USA, 7–11 September 2011)*: 19–22.
- Гидрографы гидропостов. *Информационная система по водным ресурсам и водному хозяйству бассейнов рек России*. URL: <http://gis.vodinfo.ru/> (дата обращения: 01.07.2019).
- Матишов Г.Г., Бердников С.В., Жичкин А.П., Макаревич П.Р., Дженюк С.Л., Кулыгин В.В., Яицкая Н.А., Поважный В.В., Швердяев И.В., Кумпан С.В., Третьякова И.А., Цыганкова А.Е. 2014. *Атлас климатических изменений в больших морских экосистемах Северного полушария (1878–2013). Регион 1. Моря Восточной Арктики. Регион 2. Черное, Азовское и Каспийское моря*. Ростов н/Д, изд-во ЮНЦ РАН: 256 с.
- Бухарицин А.Н., Андреев С.В., Болдырев Б.Ю. 2009. Особенности ветрового режима над акваторией Каспийского моря. *Геология, география и глобальная энергия*. 4(35): 81–89.
- Бухарицин А.Н., Синенко Л.Г., Кабдулова Р.Р. 2010. Штормовые нагоны в устье Волги. *Геология, география и глобальная энергия*. 2(37): 106–109.
- Вербицкая О.А., Зильберштейн О.И., Попов С.К., Лобов А.Л. 2002. Метод краткосрочного гидродинамического прогноза штормовых нагонов в северной части Каспийского моря и результаты его испытаний. В кн.: *Информационный сборник № 29. Результаты испытания новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических прогнозов*. М., Гидрометцентр: 76–89.

REFERENCES

1. Alekseevsky N.I., Aibulatov D.N. 2011. [Changes of the hydrographic network and the marine edge of the Volga River delta during 1800–2010]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya*. 2: 96–102. (In Russian).
2. Yaitskaya N.A., Glushchenko V.V. 2010. [Investigation of ice conditions in the North Caspian using satellite monitoring data]. In: *Materialy III nauchnoy konferentsii "Geoinformatsionnye tekhnologii i kosmicheskiy monitoring"*. [Proceedings of the III scientific conference "Geoinformation technologies and space monitoring" (Dyurso, Krasnodar Region, Russia, 8–10 September 2010)]. Rostov-on-Don, North Caucasian Centre of Science of the Higher School: 140–146. (In Russian).
3. Badyukova E.N. 2010. Evolution of the Northern Caspian Sea region and the Volga Delta in the Late Pleistocene-Holocene. *Oceanology*. 6(50): 953–960. doi: 10.1134/S0001437010060159
4. Baldina E.A., Labutina I.A. 2011. Remote sensing and mapping of the Volga River delta]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya*. 2: 78–84 (In Russian).
5. Blumberg A.F., Mellor G.L. 1987. A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model. In: *Three-Dimensional Coastal Ocean Models. Vol. 4*. Washington, American Geophysical Union: 1–16. doi: 10.1029/CO004p0001
6. Young I.R. 1999. *Wind generated ocean waves, vol. 2*. Kidlington, Elsevier: 288 p.
7. Booij N., Ris R.C., Holthuijsen L.H. 1999. A third-generation wave model for coastal regions 1. Model description and validation. *Journal of Geophysical Research*. 104(C4): 7649–7666. doi: 10.1029/98JC02622
8. Yaitskaya N.A. 2016. [Digital model of the bottom relief of the Caspian Sea]. In: *"Ekologiya, ekonomika, informatika"*: *Sbornik statey v 2 tomakh. T. 2: Geoinformatsionnye nauki i ekologicheskoe razvitie: novye podkhody, metody, tekhnologii. Geoinformatsionnye tekhnologii i kosmicheskiy monitoring*. ["Ecology, Economics, Informatics": Collection of papers in 2 volumes. Vol. 2: Geoinformation sciences and environmental development: new approaches, methods, technologies. Geoinformation technologies and space monitoring]. Rostov-on-Don, Southern Federal University: 211–217. (In Russian).
9. Yaitskaya N.A. 2018. [Creation of a digital elevation model of the Volga delta]. In: *Ustoychivoe razvitie osobo okhranyaemykh prirodnykh territoriy. Tom 5: Sbornik statey V Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. [Sustainable development of specially protected natural areas. Vol. 5: Collection of papers of the V All-Russian scientific and practical conference (Sochi, Russia, 10–12 October 2018)]. Sochi, Natural Ornithological Park in the Imeretinskaya Lowland, Don Publishing Center: 366–369. (In Russian).
10. [Topographic maps]. *Kartograficheskiy portal FGUP «GOSGISsENTR»* Available at: <http://maps.ggc.ru> (accessed 17 October 2012). (In Russian).
11. [Maps of the USSR General Staff – archive of topographic maps]. *Topograficheskie karty*. Available at: <http://satmaps.info> (accessed 1 July 2020). (In Russian).
12. [Volume 7. The Volga River – from the Volgograd hydroelectric complex to Astrakhan]. *Atlas edinoy glubokovodnoy sistemy Evropeyskoy chasti RF*. Available at: <http://roro.pro/tom-7-reka-volga-ot-volgogradskogo-gidrouzla-do-astraxani> (accessed 22 January 2021). (In Russian).
13. [32006 From Astrakhan to the Astrakhan raid]. *Interaktivnaya morskaya karta vsekh rayonov Mirovogo okeana. Severnaya chast' Kaspiyskogo morya*. Available at: <https://www.morkniga.ru/r821084-1.html> (accessed 23 January 2021). (In Russian).
14. Hutchinson M.F., Xu T., Stein J.A. 2011. Recent progress in the ANUDEM elevation gridding procedure. In: *Geomorphometry 2011 (Redlands, California, USA, 7–11 September 2011)*: 19–22.
15. [Gauge data]. *Informatsionnaya sistema po vodnym resursam i vodnomu khozyaystvu basseynov rek Rossii*. Available at: <http://gis.vodinfo.ru/> (accessed 01 July 2019). (In Russian).
16. Matishov G.G., Berdnikov S.V., Zhichkin A.P., Makarevich P.R., Dzhenyuk S.L., Kulygin V.V., Yaitskaya N.A., Povazhnyy V.V., Sheverdyayev I.V., Kumpan S.V., Tret'yakova I.A., Tsygankova A.E. 2014. *Atlas klimaticheskikh izmeneniy v bol'shikh morskikh ekosistemakh Severnogo polushariya (1878–2013). Region 1. Morya Vostochnoy Arktiki. Region 2. Chernoe, Azovskoe i Kaspiyskoe morya*. [Atlas of Climate Change in Large Marine Ecosystems of the Northern Hemisphere (1878–2013). Region 1. Seas of the Eastern Arctic. Region 2. Black, Azov and Caspian Seas]. Rostov-on-Don, Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences: 256 p. (In Russian).
17. Bukharitsin A.N., Andreev S.V., Boldyrev B.Yu. 2009. [Features of the wind regime over the Caspian Sea]. *Geologiya, geografiya i global'naya energiya*. 4(35): 81–89. (In Russian).
18. Bukharitsin A.N., Sinenko L.G., Kabdulova R.R. 2010. [Storm surges at the mouth of the Volga]. *Geologiya, geografiya i global'naya energiya*. 2(37): 106–109. (In Russian).
19. Verbitskaya O.A., Zil'bershteyn O.I., Popov S.K., Lobov A.L. 2002. [Method of short-term hydrodynamic forecasting of storm surges in the northern part of the Caspian Sea and the results of its tests]. In: *Informatsionnyy sbornik № 29. Rezul'taty ispytaniya novykh i usovershenstvovannykh metodov gidrometeorologicheskikh prognozov* [Information handbook No 29. Results of testing new and improved methods of hydrometeorological forecasts]. Moscow, Hydrometcenter of Russia: 76–89. (In Russian).

Поступила 04.03.2021