

## СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ГИДРОЛОГИИ УСТЬЕВ РЕК (К 90-ЛЕТИЮ В.Н. МИХАЙЛОВА)

УДК 556.54:551.486.6

### СОВРЕМЕННЫЕ НАУЧНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ГИДРОЛОГИИ УСТЬЕВ РЕК<sup>1</sup>

© 2022 г. М. В. Михайлова\*

*Институт водных проблем РАН, Москва, 119333 Россия*

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

Поступила в редакцию 06.12.2021 г.

После доработки 16.02.2022 г.

Принята к публикации 29.03.2022 г.

Рассмотрены современное состояние, проблемы гидрологии устьев рек, история их изучения как особых географических объектов, охарактеризованы основные научные направления и школы в изучении устьев рек. Особое внимание уделено теоретическим результатам исследований устьев рек: динамике водного потока и водному режиму, смешению речных и морских вод, морфологическим процессам. В заключении обсуждаются актуальные задачи гидрологии устьев рек.

*Ключевые слова:* река, море, устье, дельта, эстуарий, устьевые процессы, природные ресурсы, гидрология.

**DOI:** 10.31857/S032105962205011X

Устья рек — характерные элементы береговой зоны океанов, морей, озер; протяженные в пространстве и очень изменчивые во времени географические объекты; места одновременного и противоположно направленного воздействия рек (стока воды и наносов) и приемных водоемов (изменения их среднего уровня, приливов, сгонно-нагонных явлений, волнения).

Устьевые области рек (в первую очередь входящие в их состав дельты) обладают богатыми природными ресурсами: водными, земельными, биологическими, энергетическими. Это разнообразные водные объекты (устьевой участок реки, рукава и протоки дельты, дельтовые озера, пресные подземные воды, устьевые лиманы, лагуны, эстуарии, открытое устьевое взморье); плодородные земли поймы и дельты, богатая естественная флора и фауна (устья рек — районы, обладающие большим биоразнообразием и повышенной биопродуктивностью); залежи нефти и газа, энергия приливов в приливных устьях рек.

Природные богатства устьев рек давно и успешно осваиваются человеком. Основные отрасли хозяйства, тяготеющие к устьям рек и использующие их природные ресурсы, — это сельское, водное, рыбное хозяйство, водный транспорт, предприятия нефтегазовой промышленности и др. В устьях многих рек находятся крупные портовые города и промышленные центры, а в некоторых

из них — столицы государств. Развита в устьях рек рекреация, туризм, водные виды спорта. В ряде крупных дельт находятся известные во всем мире биосферные заповедники, национальные парки и охраняемые территории.

Практические потребности (освоение природных ресурсов в устьях, поддержание судоходства через устья, защита земель и населенных пунктов от наводнений речного и морского происхождения, а в последнее время и развитие в устьях ряда рек нефтегазовой индустрии) стимулировали исследования этих объектов.

Интерес к изучению устьев рек резко возрос в середине XX в. Это объяснялось двумя обстоятельствами. Во-первых, после окончания Второй мировой войны в СССР и многих странах Европы началось восстановление разрушенной войной экономики (в частности, сельского и рыбного хозяйства в устьях рек), водного транспорта и портостроения. Потребовались новые данные о гидрологическом режиме устьев рек, без которых восстановление и развитие разных отраслей хозяйства были невозможны. Во-вторых, в это же время стали проявляться первые признаки усиления воздействия на устья рек, их режим и строение естественных и антропогенных изменений внешних факторов — стока воды и наносов рек, среднего уровня морей, а главное — усиления циклонической активности и сопутствующего ей увеличения частоты и силы штормовых нагонов.

В процессе исследований устьев рек выяснилось, что методы гидрологии рек и океанологии

<sup>1</sup> Работа выполнена в рамках Государственного задания ИВП РАН (тема FMWZ-2022-0001).

в чистом виде здесь неприменимы, отсутствуют не только методы наблюдений и исследований сложных гидрологических процессов в устьях рек, но и проверенные способы регулирования их режима и надежные методы оценки гидравлических и экологических последствий инженерного вмешательства в режим устьев рек. Огромный вклад в разработку основ теории устьевых процессов и методики их изучения внес В.Н. Михайлов, один из основоположников гидрологии устьев рек, лидер московской школы исследователей устьевых областей.

Цели статьи – рассмотреть современное состояние, проблемы и задачи гидрологии устьев рек как науки и описать главные результаты исследования устьев рек в России, опираясь в основном на ключевые труды В.Н. Михайлова.

### НАПРАВЛЕНИЯ И НАУЧНЫЕ ШКОЛЫ В ИЗУЧЕНИИ УСТЬЕВ РЕК

К настоящему времени в науках, изучающих устья рек, сформировались две основные школы, имеющие ряд направлений исследований.

Первой (еще в XIX в.) сформировалась геолого-геоморфологическая школа, которая основное внимание уделяла исследованию древнедельтовых отложений (частично в связи с поиском месторождений нефти и газа). В рамках этой школы возникло геоморфологическое направление, изучающее развитие дельтовых берегов. Обзор зарубежных работ в области геологии и геоморфологии дельт дан в [27]. В России значительные результаты в изучении геоморфологии дельт и их берегов получили В.П. Зенкович, П.А. Каплин, В.Н. Коротаев, О.К. Леонтьев, Г.И. Рычагов, Г.А. Сафьянов, А.А. Свиточ, И.С. Шукин.

Вторая школа в изучении устьев рек – гидрологическая. Ее развитие привело к возникновению новой отрасли науки – гидрологии устьев рек, промежуточной между гидрологией рек и океанологией и частично связанной с геоморфологией устьев рек. В гидрологической школе оформились два разных направления в исследовании устьев – отечественное и зарубежное. Различия между ними обусловлены тем, что в Западной Европе и США преобладают устья рек эстуарного типа, а в странах бывшего СССР – дельтового. За рубежом в связи с хозяйственным использованием эстуариев были проведены крупные исследования динамики и смешения вод в эстуариях, воздействия штормовых нагонов, процессов заносимости судоходных каналов. Наиболее важные результаты исследований эстуариев за рубежом приведены в [4, 28–32].

Главная особенность гидрологического направления в изучении устьев рек в СССР и России – это широкий географический подход в ис-

следованиях: помимо положений гидрологии рек и океанологии учитывается влияние на устья рек метеорологических и ландшафтных факторов, а также местной хозяйственной деятельности.

Инициаторами изучения дельт в СССР были Б.А. Аполлов, В.Е. Ляхницкий, И.В. Самойлов. Особое развитие гидрологические исследования устьев рек получили в Государственном океанографическом институте (ГОИИ). В апреле 1948 г. директор ГОИИ инженер-контр-адмирал Н.Н. Зубов провел межведомственное совещание представителей научных учреждений, проектных институтов и разных отраслей хозяйства, на котором было принято решение о создании в ГОИИ первого в стране научного подразделения по изучению устьев рек и организации сети устьевых гидрометеостанций в ряде устьев крупных рек страны. Н.Н. Зубов полагал, что развивать учение об устьях рек будет легче в рамках океанологии, поскольку в устьях рек гидрологический режим более сложен, нежели в самих реках.

В 1954 г. в ГОИИ была создана лаборатория морских устьев рек, которой были поручены разработка нового направления в науке, научно-методическое руководство сетью специализированных устьевых гидрометеостанций и обсерваторий в устьях важнейших рек страны (таких систем не было ни в одной стране мира), организованных в это время в Гидрометслужбе СССР и внесших в последующие годы большой вклад в изучение устьев рек и обслуживание разных отраслей хозяйства.

С целью изучения устьев рек в Советской Арктике в Арктическом и Антарктическом научно-исследовательском институте (АНИИ) был создан отдел устьевых участков рек (в 1979 г. переименован в отдел гидрологии устьев рек и водных ресурсов).

Сотрудниками ГОИИ и АНИИ созданы основы современной отечественной гидрологической школы по изучению устьев рек, проведены первые крупные послевоенные экспедиции в устьях рек, разработаны основы теории устьевых процессов и методов их изучения. В.Н. Михайловым в 1971 г. в ГОИИ издана одна из первых монографий по теории устьевых процессов [7].

Исследования устьев рек начаты И.В. Самойловым, С.С. Байдиным, М.М. Роговым, Н.А. Скриптуновым, А.И. Симоновым, В.Н. Михайловым (ГОИИ); В.С. Антоновым, В.В. Ивановым, Ю.В. Налимовым, А.П. Граевским (АНИИ). В ГОИИ в эти годы была подготовлена и опубликована уникальная серия справочно-режимных монографий по гидрологии устьев важнейших рек СССР: Волги, Терека и Сулака, Куры, Дона, Кубани, Дуная, Днепра и Южного Буга, Западной Двины (Даугавы), Невы, Северной Двины, Амударьи, а также руководств по исследованию

устьев рек и прибрежной зоны морей (1965, 1972, 1973, 1975 гг.). ААНИИ издал монографии по гидрологии устьев рек Оби и Лены.

В исследования устьев рек большой вклад внесли местные подразделения Гидрометслужбы, специализированные устьевые гидрометеостанции и обсерватории. В конце 1970-х гг. к исследованию устьев рек подключились географический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова и Институт водных проблем АН СССР (ныне ИВП РАН). Обзоры гидрологических исследований в устьях рек СССР и России приведены в [2, 3, 5–26].

В России наиболее изученными оказались устья рек Волги, Терека, Сулака, Дона, Кубани, Невы, Северной Двины, Печоры, Оби, Енисея, Лены, Амура, а также устья рек п-ова Камчатка (обзоры результатов исследований устьев основных рек России приведены в [1, 3, 10, 24–26]), в странах бывшего СССР – Дуная, Днепра и Южного Буга, Риони, Урала, Куры, Амударьи, Даугавы.

В [6, 10, 12, 14, 21, 22, 25] опубликованы систематизированные современные количественные данные о главных факторах, влияющих на устья рек России и мира: стока воды и наносов, а также изменений уровня воды у берегов морей (с учетом просадки грунта).

Изданы крупные коллективные монографии по гидрологии устьев рек Волги (1998 г.), Терека и Сулака (1993 г.), устьев всех рек Каспийского региона (2013 г.), Енисея (1991 г.), Яны (1998 г.), Индигирки (2001 г.), Дуная (1963, 2004 гг.) и Кубани (2010 г.).

В.Н. Михайловым была организована подготовка по единой методике и издание аналитических обзорных работ по гидрологии устьев зарубежных рек, недостаточно известных в России. Опубликованы (в основном в журнале “Водные ресурсы”) отдельные статьи по устьям следующих рек: Риони, Дунай, По, Тибр, Рона, Эбро, Луара, Сена, Рейн и Маас, Темза, Эльба, Висла, Неман (Нямунас) (зарубежная Европа); Хуанхэ, Янцзы, Чжуцзян (Жемчужная), Хонгха (Красная), Меконг, Чаупхрая, Иравади, Ганг и Брахмапутра, Годавари, Шатт-эль-Араб, Инд (зарубежная Азия); Нил, Конго, Нигер, Сенегал, Гамбия, Замбези (Африка); Фрейзер, Колумбия, Колвилл, Маккензи, Св. Лаврентия, Делавэр, Саскуэханна и Потомак, Миссисипи (Северная Америка); Ориноко, Амазонка (Южная Америка). В этих публикациях приняли активное участие В.Н. Михайлов (МГУ), М.В. Михайлова, Е.Н. Долгополова, М.В. Исупова (ИВП РАН), Н.И. Алексеевский, Д.Б. Бабич, В.В. Иванов, В.Н. Коротаев, В.И. Кравцова, Д.В. Магрицкий, а также аспиранты и студенты кафедры гидрологии суши географического факультета МГУ. В написании обзорных статей также участвовали специалисты из Грузии (Ш.В. Джаошвили), Украины

(В.Н. Морозов и др.), Литвы (Р. Жаромскис), Италии (П. Беллотти и др.), Китая (Ц. Ли, Ш. Лю и др.).

## ОБЪЕКТ ГИДРОЛОГИИ УСТЬЕВ РЕК, ЕГО ОПРЕДЕЛЕНИЕ, ГРАНИЦЫ, ЧАСТИ И ТИПЫ

### *Устье реки как особый географический объект и его научное определение*

Объектами гидрологии устьев рек как науки служат устьевые области рек (или устья рек как краткий синоним). Термин “устьевая область” в 1952 г. предложил И.В. Самойлов в книге “Устья рек”, но определения ему не дал. Современное определение объекта гидрологии устьев рек, согласно [6, 11, 17, 18], может быть сформулировано следующим образом: “Устьевая область реки (устье реки) – особый географический объект, охватывающий район впадения реки в приемный водоем (океан, море, озеро), обладающий специфическим строением и экологическими условиями, переходным от речного к морскому (озерному) гидрологическим режимом и формирующийся и изменяющийся под воздействием специфических устьевых процессов – динамического взаимодействия и смешения водных масс реки и приемного водоема, отложения и перетолжения речных и частично морских (озерных) наносов, приводящих к образованию устьевого конуса выноса, а часто и дельты”.

### *Границы устья реки*

Из приведенного выше определения устьевой области реки следует, что границы этого объекта должны соответствовать пределам действия устьевых процессов – взаимодействия речной и морской (озерной) водных масс и специфических процессов переноса отложения наносов и дельтообразования. Поэтому верхняя (речная) граница устьевой области должна соответствовать дальности распространения в сторону суши морского воздействия в виде приливных и сгонно-нагонных колебаний уровня, а нижняя граница – дальности распространения влияния опресняющего речного водного стока на прибрежную зону моря или озера. Применение этих очевидных принципов выделения границ, как показывает опыт, сопряжено с большими трудностями. Устьевые области могут занимать обширные пространства в береговой зоне как на суше, так и в прибрежной зоне моря (озера); протяженность устьевой области реки способна достигать многих десятков и сотен километров, а площадь – десятков тысяч квадратных километров. Кроме того, устья рек могут изменять свое географическое положение, форму, границы и размеры при крупномасштабных изменениях как уровня моря (озера), так и

стока реки. Таким образом, понятия “современное устье реки”, “современная дельта” приобретают большую неопределенность.

Например, многие считают “современными” дельты, начавшие формироваться в конце голоценовой трансгрессии Мирового океана, т.е. 7–9 тыс. лет назад. В Италии современной дельтой р. По считают дельту, сформировавшуюся с XVII в., после дельты эпохи Возрождения. Китайские специалисты называют современной дельту Хуанхэ, формирующуюся в зал. Бохайвань Желтого моря севернее Шаньдунского п-ова после прорыва сюда реки в 1855 г.

Выделение границ устьевых областей рек имеет важное значение не только с позиций формального географического районирования, но и с сугубо прагматической точки зрения. Во-первых, устьевые области рек стали конкретными объектами в зоне ответственности соответствующих устьевых гидрометеорологических станций, устьевых гидрометеорологических обсерваторий, региональных центров по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. Во-вторых, именно в этих объектах необходимо было применять специально разработанные методы наблюдений и расчетов.

Поэтому при изучении устьев рек необходимо учитывать следующие положения.

1. Географическое место устья реки как протяженного в пространстве природного объекта, его границы и размер зависят прежде всего от крупномасштабных изменений среднего (фоновое) уровня приемного водоема. Так, морские устья рек при вековом или многолетнем повышении уровня моря (морской трансгрессии) подвергаются частичному или полному затоплению; зона взаимодействия реки и моря, верхняя (речная) и нижняя (морская) границы устья смещаются в сторону суши. В затопленной части старого устья на длительное время сохраняются отложения и формы рельефа существовавшей здесь ранее дельты. Во время понижения уровня моря (морской регрессии) зона взаимодействия вод реки и моря и границы устья смещаются в сторону моря, где начинают отлагаться речные наносы и формироваться новая дельта. В верхней части старого устья сохраняются отложения и формы рельефа ранее существовавшей здесь дельты. Таким образом, в каждый короткий интервал времени устье реки, где происходит взаимодействие вод реки и моря, может находиться в пределах очень протяженной области реликтов (отложений и форм рельефа более древних устьев этой реки). В качестве примеров реликтов дельт, сформировавшихся при более высоком стоянии уровня приемного водоема, можно привести отложения и формы рельефа старых дельт Волги, Урала, Терека и Кумы на суше на большом расстоянии от современ-

ного берега Каспийского моря. Примером дельт, существовавших при низком уровне Каспия, могут служить остатки объединенной дельты Волги, Урала и Терека на дне Каспийского моря [10, 25]. Следы древних дельт также обнаружены на дне океанов и морей вблизи современных устьев Дуная, Тибра, Янцзы и др.

2. Второй по важности внешний фактор, влияющий на географическое положение, размеры и границы устьев рек, – это значительные естественные (климатически обусловленные) и антропогенные изменения стока воды и наносов рек. Известно, что в холодные и влажные многолетние периоды сток воды и наносов рек возрастает и это сопровождается активным выдвиганием речных дельт в море. В жаркие и сухие многолетние периоды сток воды и наносов рек уменьшается, что ведет к замедлению выдвигания дельт в море или даже к их размыву.

Основные антропогенные изменения стока воды и наносов обусловлены регулированием режима рек в результате сооружения крупных водохранилищ. Поэтому уменьшение расхода воды реки в половодье и увеличение в межень, а также отложение наносов в водохранилищах неизбежно влияют на размеры зоны взаимодействия вод реки и моря и особенности развития дельт. Это позволяет считать современными как само устье, так и его режим только в период зарегулирования реки крупными водохранилищами или после значительного изъятия воды на хозяйственные нужды.

3. Даже в условиях относительной стабильности уровня моря и средних величин стока воды и наносов реки на границы зоны взаимодействия вод реки и моря в каждый момент времени существенное влияние оказывают отклонения гидрологических характеристик от средних значений (нормы) во время резких (экстремальных) паводков и половодий или штормовых нагонов. Выделять границы устья реки при очень редких гидрологических событиях с практической точки зрения нецелесообразно, так как в этих случаях неоправданно увеличиваются размеры устья реки. Для установления предельного размера зоны взаимодействия вод реки и моря ранее использовали ряд сложных расчетных методов [5–8, 17], но можно применить и более простой способ. В качестве верхней (речной) границы устья реки предлагается принимать дальность распространения вверх по течению повышений уровня воды либо при сизигийных приливах, либо при нагонах 10%-й обеспеченности (с повторяемостью 1 раз в 10 лет) при средних минимальных расходах воды в межень в период после зарегулирования стока реки. В качестве нижней (морской) границы устья реки предлагается принимать внешний край зоны опреснения, выделенный по положению в поверхностном слое моря изогалины со

значением, отличающимся на 10% от средней солености вод моря в период средних максимальных расходов воды в половодье при зарегулированном режиме реки.

Таким образом, в настоящее время (начало третьего десятилетия XXI в.) современными следует считать само устье и его режим, сформировавшиеся в течение довольно непродолжительного периода времени: после зарегулирования реки и в условиях незначительных изменений уровня приемного водоема. Для слабо изменяющихся устьев рек такой период не должен превышать 30–50 лет, для быстро изменяющихся – еще меньше.

#### *Районирование устьев рек*

В отечественной литературе долгое время отдавалось предпочтение двучленному принципу районирования устьев рек. В морском устье реки выделяли две крупные части: речную (устьевой участок реки, включая дельту, если она имелась) и морскую (устьевое взморье, включая водоем эстуарного типа, если он имелся). Однако в результате детального изучения структуры и режима не только отечественных, но и большинства зарубежных устьев рек В.Н. Михайлов совместно с С.Л. Гориним [11, 17] разработал новые принципы районирования устьев рек. Предложено дельту (низменность в устье реки, рассеченную сложной и изменчивой гидрографической сетью) считать не частью реки, а особым географическим объектом, входящим в состав ее устья. Обоснования такого предложения следующие: большая часть дельты – это суша, причем не целиком заливаемая речными водами; в дельте много озер и болот, не связанных непосредственно с рекой; для дельты характерен специфический ландшафт, существенно отличающийся от ландшафта обычных речных пойм. Аналогичное заключение касается и эстуарных водоемов в устье реки (полузакрытых водных объектов, в пределах которых речные воды смешиваются с морскими). Такие водоемы часто настолько изолированы от моря, что признать их частью моря нельзя. Эстуарии могут входить в состав устья реки как особые самостоятельные объекты.

В итоге установлено, что устьевая область реки может включать в себя четыре части: находящийся выше вершины дельты или эстуария и подверженный влиянию подпора со стороны моря, приливов и нагонов устьевой участок реки; дельту; эстуарий; подверженную опресняющему воздействию речного стока устьевую зону приемного водоема (в морских устьях – устьевое взморье). За пределами перечисленных частей устья реки (с учетом критерия выделения их речной и морской границ, установленных выше) находятся приустьевой участок реки, куда в межень могут

распространяться очень крупные нагонные волны, и предустьевое пространство моря, где в период очень крупного половодья может сказываться некоторое опресняющее влияние реки.

#### *Типизация устьев реки и их частей*

В научной литературе есть много типизаций (классификаций) устьев рек и их частей (в том числе дельт и эстуариев); их анализ приведен в [2, 4–12, 17, 18, 22, 24, 26–31, 34]. В типизациях дельт, эстуариев и устьев рек в целом отмечаются большие противоречия. Так, часто любые устья называют эстуариями, в одних случаях дельту считают одним из типов эстуария, в других – эстуарий считают одним из типов дельты. Ряд отечественных геоморфологов подразделяет все устья на два типа: дельты и эстуарии, хотя эти объекты – всего лишь части устья реки.

Предложения В.Н. Михайлова по типизации отдельных частей устьев рек сводились к следующему. Устьевые участки рек по морфологии можно подразделить на два типа: с широкими заливаемыми поймами; без пойм или с обвалованными поймами. По гидрологическому режиму эти участки делятся на три типа: с преобладанием влияния приливов; с преобладанием влияния нагонов; подвергшиеся влиянию подпора при поднявшемся уровне моря (озера).

В.Н. Михайлов с соавторами в своих исследованиях речных дельт придерживается следующих принципов типизации этих объектов [6, 8, 11, 16–19, 22]: все дельты подразделяются на два типа – дельты выполнения (заполнения), формирующиеся в верхних частях водоемов эстуарного типа (лиманах, лагунах и др.); дельты выдвигения, формирующиеся в прибрежной части приемного водоема. Кроме того, авторы подразделяют все дельты на неприливные и приливные. При типизации неприливных дельт выдвигения, следуя предложением О.К. Леонтьева (1955 г.), дельты можно подразделять по степени воздействия на них речного стока воды и наносов, с одной стороны, и морского волнения – с другой, и как следствие – по характеру морского края дельты. Выделено пять типов дельт: 1) лопастные с сильно изрезанным морским краем; 2) лопастные со слабо изрезанным морским краем; 3) дугообразные с изрезанным морским краем; 4) дугообразные с выровненным морским краем; 5) с прямолинейным морским краем. В [6] эта типизация дельт выдвигения дополнена несколькими количественными параметрами по степени выдвигнутости дельты в море и изрезанности морского края, а также количественным критерием соотношения воздействия на морской край реки (ее стока наносов) и моря (энергии волнения).

Обзоры предложений по типизации эстуариев приведены в [4–6, 8, 11, 28–32]. Поскольку эстуарии изучены в западных странах лучше, чем в России, В.Н. Михайлов и соавторы в основном придерживаются типизаций эстуариев, изложенных в [28–32]. По морфологии и происхождению эстуарии подразделяют на затопленные речные долины (лиманы, губы), лагуны, воронкообразные приливные эстуарии, фиорды. По величине приливов эстуарии, согласно [28, 30], можно подразделить на неприливные (величина прилива  $\Delta H_{\text{пр}} < 0.2$  м), микроприливные ( $0.2 \text{ м} < \Delta H_{\text{пр}} < 2$  м), мезоприливные ( $2 \text{ м} < \Delta H_{\text{пр}} < 4$  м), гиперприливные ( $\Delta H_{\text{пр}} > 4$  м). По степени вертикального перемешивания вод эстуарии делят на следующие типы: с полным перемешиванием, с частичным перемешиванием, с клином осолоненных вод у дна, с узким слоем пресных вод у поверхности.

Устьевые зоны приемных водоемов (устьевые взморья) по рельефу дна подразделяют на приглубые (уклон дна  $>1\%$ ) и отмельные (уклон дна  $<1\%$ ); по преобладающей солености воды  $S$  — на пресные ( $S < 1\%$ ), солоноватые ( $1\% < S < 24.7\%$ ), соленые ( $24.7\% < S < 50\%$ ), гиперсоленые ( $S > 50\%$ ); по величине приливов — так же, как эстуарии.

Устьевые области рек (устья рек) по географическому положению подразделяют на океанические, морские, озерные. По величине приливов — так же, как устьевые взморья или эстуарии. Более сложна типизация устьев рек по строению. Авторами [8, 11] предложена новая типизация устьев рек. Устья рек подразделены на пять типов: I — простые (например, устья малых рек Черноморского побережья Кавказа); II — эстуарные бездельтовые (устья Мезени, Пенжины, Темзы); III — эстуарно-дельтовые с дельтой выполнения (устья Оби, Енисея, Печоры, Днепра, Днестра); IV — дельтово-эстуарные, главный элемент которых — крупная дельта, имеющая либо лагуны вдоль морского края дельты (устья Кубани, Сулака, Кумы, Нила), либо эстуарные приливные расширения в устьях рукавов (устья Иравади, Амазонки, Ориноко); V — дельтовые без эстуарных водоемов (устье Волги).

Новые принципы районирования и типизации устьев рек уже применяются при описании устьев рек России [3] и мира.

#### ПРЕДМЕТ ГИДРОЛОГИИ УСТЬЕВ РЕК. УСТЬЕВЫЕ ПРОЦЕССЫ И ВЛИЯЮЩИЕ НА НИХ ФАКТОРЫ

Предмет гидрологии устьев рек как естественной науки — это не только устья конкретных рек как географические объекты и пространственно-временные изменения их гидрологического режима и строения, но и сложный комплекс про-

цессов, называемых устьевыми, которые формируют эти объекты и их изменяют. Классификация таких процессов приведена в [5, 6, 8, 16]. Устьевые процессы включают в себя физические процессы, создающие рассматриваемые объекты и определяющие их пространственно-временные изменения; химические процессы, формирующие химический состав и качество вод в устьях рек; биохимические процессы, управляющие взаимодействием биоты и химического состава вод; биологические процессы, регулирующие развитие наземной, водной и околоводной биоты в устьях рек.

Основные понятия гидрологии устьев рек изложены, помимо многочисленных научных работ, в статьях В.Н. Михайлова и М.В. Михайловой в энциклопедиях: “Большая российская энциклопедия” (2004–2017 гг.), “Экологическая энциклопедия” (2008–2013 гг.), “Реки и озера мира” (2012 г.) и “Вода России” (интерактивный образовательный интернет-портал).

Главная роль в формировании устьев рек принадлежит физическим процессам [6, 8, 16]: динамике водного потока и водному балансу дельты; смещению речных и морских (озерных) вод; движению наносов и их балансу в устьях рек; морфологическим (эрозионно-аккумулятивным), включающим в себя русловые деформации в водотоках, динамику морского края дельты, изменения дна устьевого взморья. В.Н. Михайловым и М.М. Роговым [18] эти процессы в совокупности названы гидролого-морфологическими. Позже этот термин получил признание в отечественной литературе по устьям рек [3, 16, 24–26]. Именно этим процессам уделено основное внимание при рассмотрении современного состояния гидрологии устьев рек в настоящей статье.

На гидролого-морфологические процессы в устьях рек влияет комплекс внешних и внутренних естественных и антропогенных факторов. Типизация этих факторов с характеристикой их воздействия на процессы в устьях рек приведена в [3, 6, 8, 10, 13–19, 23, 25]. К внешним речным факторам относятся сток воды и наносов реки и его естественные (климатические) и антропогенные изменения. Внешние морские факторы — изменения среднего уровня моря, приливы, нагоны, волнение. К внутренним (местным) антропогенным факторам можно отнести следующие: обвалование рукавов дельты; водозабор из устьевых водотоков и водоемов на хозяйственные нужды; углубление, перекрытие, спрямление водотоков дельты и сооружение прорезей через устьевые барьеры для улучшения условий судоходства; мелиорация дельты (обводнение водоемов, орошение или осушение земель); инженерные мероприятия по защите земель и населенных пунктов в дельте от

затопления, а берегов водотоков или морского края дельты – от размыва и др.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ УСТЬЕВ РЕК

### *Динамика водного потока и водный режим*

1. Сопряжение реки и приемного водоема при установившемся режиме.

В 1950-х гг. в отечественной гидрологической литературе велась дискуссия о характере гидравлического сопряжения реки и приемного водоема. По одной версии, в связи с тем, что сезонные изменения уровня воды в водоеме невелики, а в реке могут быть очень большими, на нижнем участке реки всегда должна формироваться выпуклая кривая гидравлического спада; по другой версии, основанной на наблюдениях в устьях рек в межень, водоем всегда создает подпор во впадающей в него реке и здесь формируется вогнутая кривая гидравлического подпора.

Чтобы разобраться в этом вопросе, В.Н. Михайловым [7] были проведены детальные расчеты форм сопряжения водного потока (условной реки) с приемным водоемом (условным морем) в гипотетическом прямоугольном русле с постоянным уклоном дна с помощью строгого гидравлического метода В.И. Чарномского. На большом удалении от водоема было задано ступенчатое изменение расхода воды  $Q_p$ , на нижнем конце русла, в его устьевом створе – ступенчатое изменение уровня приемного водоема  $H_m$ . На верхнем конце участка глубина потока (глубина равномерного режима, или “нормальная” глубина) зависит только от величины  $Q_p$ , задана графиком  $h_0 = f(Q_p)$  и может быть рассчитана по формуле Шези–Маннинга; в устьевом створе глубина русла  $h_y$  зависит только от  $H_m$ .

Расчеты показали следующее: равномерный режим на участке, когда средние скорости потока  $V$ , уклон водной поверхности  $I$  и глубина  $h$  вдоль потока неизменны, может быть лишь при условии  $h_0 = h_y$ ; если  $h_0 > h_y$ , то на участке русла формируется выпуклая кривая гидравлического спада ( $V$  и  $I$  вдоль потока увеличиваются,  $h$  уменьшается); если  $h_0 < h_y$ , то формируется вогнутая кривая гидравлического подпора ( $V$  и  $I$  вдоль потока уменьшаются,  $h$  увеличивается); при заданной величине  $H_m$  условие  $h_0 = h_y$  выполняется только при единственном расходе воды  $Q_p$ , а при заданной величине  $Q_p$  – только при единственной величине  $H_m$ ; уровни воды в разных пунктах участка (кроме его концов) выражены семейством кривых вида

$$H_i = \varphi(Q_p, H_m). \quad (1)$$

Полученные в результате расчетов выводы применимы и к устьям рек в естественных условиях. Построенные в [7, 8] типовые графики связи между разными гидрологическими характеристиками в зоне переменного спада или подпора могут послужить образцами при обработке данных наблюдений в устьях рек.

В настоящее время в условиях ускоряющегося повышения уровня Мирового океана и связанных с ним морей [12, 14, 15] актуальными становятся расчет и прогноз распространения в устье рек подпора со стороны моря. Для точного расчета кривой свободной поверхности в реках при подпоре можно использовать, например, метод Н.Н. Павловского. Однако в многорукавных системах такой расчет затруднен. Поэтому В.Н. Михайлов предложил простой эмпирический метод расчета дальности подпора  $L_{\text{под}}$  (км), используя формулу

$$L_{\text{под}} = k \Delta H_m / I, \quad (2)$$

где  $\Delta H_m$ , м – величина повышения уровня моря;  $I$ , ‰ – уклон водной поверхности на участке в межень до начала повышения уровня моря. Применение формулы (2) для устьев рек Урал, Терек, Сулак и Кура в период повышения уровня Каспийского моря на 2.35 м в 1978–1995 гг. дало правдоподобные результаты. Для всех перечисленных дельт повышение уровня воды на их морском крае  $\Delta H_{\text{мкл}}$  совпадало с повышением уровня моря  $\Delta H_m$ . Исключением стало устье Волги, где из-за наличия обширного мелководного взморья (так называемой буферной зоны) подъем уровня на морском крае дельты составил лишь 0.8 м, т. е. был намного меньше  $\Delta H_m$ . Поэтому в формуле (2) для дельты Волги надо учитывать не  $\Delta H_m$ , а  $\Delta H_{\text{мкл}}$ . Расчеты для всех устьев дали наилучшие результаты при  $k = 2.0$ , что соответствует кривой подпора в виде части полуокружности.

При оценке влияния на устья рек изменений среднего уровня моря (фоновое, осредняющего его сезонные, приливные, сгонно-нагонные колебания) учитывается, что реальное (фиксируемое на гидрологическом посту) многолетнее изменение уровня моря – относительное, так как становится алгебраической суммой эвстатического повышения или понижения уровня моря и величины просадки грунта, которая всегда сопровождается опусканием реперов и других устройств поста и, как следствие, “видимым” ростом уровня моря на этом посту в береговой зоне. В дельтах рек просадка грунта может быть вызвана естественным уплотнением и обезвоживанием влажных и рыхлых отложений, а также антропогенными факторами – откачкой нефти, газа, пресных подземных вод. Если эвстатическое повышение уровня Мирового океана и связанных с ним морей в настоящее время составляет 3–4 мм/год, то

вследствие только просадки грунта рост уровня может достигать 5–20 мм/год [12, 14, 33].

2. Сопряжение реки и приемного водоема при неустановившемся режиме.

Для приближенной оценки дальности распространения приливов в реки и рукава дельт  $L_{пр}$  В.Н. Михайлов использует известную формулу В.Е. Ляхницкого, сходную по структуре с формулой (2) и имеющую вид  $L_{пр} = kA/I_{ст}$  ( $A$  – амплитуда прилива в устьевом створе,  $I_{ст}$  – средний уклон водной поверхности в русле за приливный цикл,  $k$  – коэффициент, равный 1 или 1.5).

Для расчета нагонных колебаний уровня воды в реке или рукавах дельт В.Н. Михайловым разработан [6–8] и проверен на примере устьев Дона и Дуная специальный метод, основанный на экспоненциальном законе затухания волн нагонов в устьях рек. Расчетная формула следующая:

$$\Delta H_{нг x} / \Delta H_{нг 0} = \exp(-kx), \quad (3)$$

где  $\Delta H_{нг x}$  – высота нагона (м) над предшествующим уровнем воды на расстоянии  $x$  (км) от устьевого створа;  $\Delta H_{нг 0}$  – то же в устьевом створе,  $k$  – декремент затухания нагона, равный  $k = aQ + b$  ( $Q$  – расход воды до начала нагона). Из формулы (3) после ее логарифмирования можно получить выражение для дальности распространения нагона

(км):  $L_{нг} = \frac{1}{k} \ln \left( \frac{\Delta H_{нг 0}}{0.05} \right)$ , здесь 0.05 – минимальное повышение уровня (м), которое можно надежно измерить.

В.Н. Михайловым впервые проведено совместное исследование на экстремумы уравнений движения, неразрывности и транспортирующей способности водного потока для приливного цикла в устье реки [6, 8]. В частности, математически доказано, что поворот течения с прямого (отливного) на обратное (приливное) происходит немного позже малой воды (наступления минимального уровня в отливную фазу), а поворот течения с приливного на отливное – немного позже полной воды (максимального уровня в приливную фазу); максимальные скорости прямых течений наблюдаются приблизительно в середине периода падения уровня, а максимальные обратные – в середине периода роста уровня; наибольшая мутность воды отмечается в течение приливного цикла дважды, немного опережая экстремумы скоростей течения. В результате проведенного анализа построены типовые петлеобразные графики связи между взятыми попарно гидрологическими характеристиками [6, 8]; эти графики могут помочь при обработке данных измерений. Итоги анализа подтверждены результатами наблюдений в приливных устьях Северной Двины, Мезени, Темзы и Меконга.

3. Распределение стока воды по рукавам дельт.

В конце 1960-х гг. сначала К.В. Гришаниным, а позже В.В. Ивановым были предложены два схожих итерационных гидравлических метода расчета распределения расходов воды по рукавам дельт. Вместо этих сложных методов В.Н. Михайлов разработал более простой аналитический способ расчета, названный методом общих (суммарных) модулей сопротивления, рассчитываемых по особым правилам отдельно для последовательного, параллельного и последовательно-параллельного соединения участков русловой сети дельты [6, 8, 13, 16, 18]. Предложенный метод пригоден для расчета распределения расходов воды в прогрессивно дробящейся сети водотоков любой сложности. Он базируется на трех допущениях: полного водного баланса в русловой сети всей дельты и в отдельных ее узлах; равенства падений уровня  $\Delta z$  по любому направлению от вершины дельты до моря; квазиравномерного движения воды в водотоках дельты, описываемого уравнением  $\Delta z = FQ^2$  ( $F$  – модуль гидравлического сопротивления водотока, не зависящий, согласно постулату Павловского, ни от  $\Delta z$ , ни от  $Q$ ). Модуль сопротивления рассчитывается по уравнению  $F = Ln^2/B^2 h^{10/3}$ , вытекающему из формулы Шези–Маннинга; здесь  $L$ ,  $B$ ,  $h$  – соответственно длина участка русла, его средняя ширина, средняя глубина,  $n$  – коэффициент шероховатости. Например, для простой двухрукавной дельты имеем  $Q_1/Q_2 = \sqrt{F_2/F_1}$  и  $Q_1 + Q_2 = Q_0$ . При заданной величине расхода воды реки выше вершины дельты  $Q_0$  в любом узле разветвления расход воды будет больше в том рукаве, ширина и глубина которого больше, а длина и шероховатость меньше, чем смежного.

Применение этого метода расчета распределения расходов воды по рукавам гипотетической дельты [13, 16] и дельт Куры, Дуная и других подтвердило следующий важный вывод. Русловая сеть любой дельты – это единая система морфологически и гидравлически взаимосвязанных элементов. Естественное или антропогенное изменение размера русла и шероховатости дна любого водотока в этой системе неизбежно должно привести не только к изменению доли водного стока в этом водотоке и ниже его по течению, но и в смежных водотоках, а также распространиться вверх по течению вплоть до вершины дельты и даже в совсем другую ее часть. Такая особенность дельт часто не учитывается при проведении инженерных мероприятий в этих объектах.

4. Водный баланс дельт.

Долгое время считалось, что все дельты из-за испарения воды теряют часть водного стока реки. Наблюдения в дельтах Волги, Терека, Урала, Дуная, Или, Инда, Нила подтверждали такое мнение. Однако более детальные исследования в других дельтах показали, что роль дельт в изменении



среднемноголетнего водного стока рек более сложная (обзор проблемы дан в [6, 8]). В дельтах как аazonальных географических объектах увлажнение создается не столько местными осадками  $P$ , сколько водным стоком самой реки. Поэтому реальное испарение с поверхности дельты значительно больше зональной величины испарения и приблизительно равно зональной величине испаряемости  $E_0$ . С наиболее сухих частей дельты испарение меньше  $E_0$ ; с поверхности водотоков и водоемов – равно  $E_0$ ; с болот, плавней, заросших водоемов из-за большой роли транспирации – больше  $E_0$ . В итоге изменение среднемноголетнего стока воды реки в пределах дельты  $\Delta W_Q$  (км<sup>3</sup>/год) зависит от соотношения  $P$  и  $E_0$  (мм/год):

$$\Delta W_Q = (P - E_0)F_d \times 10^{-6}, \quad (4)$$

$F_d$ , км<sup>2</sup> – площадь дельты.

Проведенные расчеты для многих дельт мира [6, 8, 13, 16] показали, что в областях избыточного увлажнения (здесь индекс сухости по М.И. Будыко:  $E_0/P < 0.4$ ) и в областях достаточного увлажнения ( $0.4 < E_0/P < 1.0$ ) водный баланс дельт положительный и в их пределах происходит добавление водного стока, а в областях недостаточного увлажнения ( $1.0 < E_0/P < 3.0$ ) и сухих ( $E_0/P > 3.0$ ) водный баланс дельт отрицательный – происходит потеря водного стока. Реки, в дельтах которых добавление водного стока наибольшее, – Амазонка, Ганг и Брахмапутра, Нигер, Меконг, Иравади, Красная.

#### 5. Динамика речной струи на устьевом взморье.

В.Н. Михайловым доказано теоретически и подтверждено данными наблюдений [5, 6], что на открытом, приглубом и неприливном устьевом взморье средняя скорость течения в инерционной струе, вытекающей из реки или рукава дельты, затухает в сторону моря по экспоненциальному закону

$$V_x/V_0 = \exp(-kx/h_0), \quad (5)$$

здесь  $V_0$  – скорость течения в начальном створе струи, где глубина равна  $h_0$ ;  $V_x$  – скорость течения на расстоянии  $x$  (м) вдоль струи;  $k$  – декремент затухания, изменяющийся в узких пределах – от 0.0020 до 0.0030.

6. Влияние на водный режим дельт местных водохозяйственных и гидротехнических мероприятий.

В [13] В.Н. Михайлов и М.В. Михайлова систематизировали сведения о закономерностях воздействия инженерных мероприятий в дельтах на их гидрологический режим и рассмотрели способы расчета влияния двустороннего обвалования рукавов на повышения в них уровня воды, приемы оценки противоречивого воздействия крупных водозаборов и вододелителей на режим

дельт, методы прогноза воздействия на режим дельт мероприятий по улучшению условий судоходства (углубления рукавов и их устьевых баров, спрямления и перекрытия рукавов и др.); приемы оценки влияния на водный баланс дельт их осушения или обводнения и др.

### *Смешение речных и морских вод*

#### 1. Устьевая зона смешения.

В морских устьях рек взаимодействуют две существенно различающиеся по физическим, химическим и гидробиологическим свойствам первичные водные массы – речная и морская. В районе этого взаимодействия формируется так называемая устьевая зона смешения. В устьях крупных рек она может занимать обширные площади; например, зона опреснения в устье Амазонки распространяется в океан на расстояние до 900 км. Строгая теория зоны смешения пока не создана, однако в [6, 8, 14, 23] высказан ряд предложений, касающихся структуры и режима этой зоны. Предложено считать внутренней границей устьевой зоны смешения изогалину 1‰ у дна, а внешней – изогалину в поверхностном слое, значение которой составляет 90% средней солености вод данного моря. В пределах зоны смешения можно выделить фронтальную подзону (область максимальных продольных градиентов солености воды), а внутри этой подзоны – вертикальную поверхность – геометрическое место экстремальных продольных градиентов солености воды (фронтальный раздел). Проекция этого раздела на поверхность моря – это гидрофронт. В период половодья на реке, в отливную фазу, при сгонах эти границы смещаются в сторону моря; в период межени, в приливную фазу, при нагонах – в сторону суши (при этом зона смешения может распространяться в русло реки или рукава дельты).

Процесс возрастания солености воды вдоль зоны смешения от устьевого створа в сторону моря можно объяснить исходя из закономерностей затухания скорости течения в речной струе на взморье (формула (5)). На боковых и нижней границах речной струи во фрикционное движение вовлекаются смежные морские воды. Вследствие этого расход смешанных речных и морских вод вдоль струи возрастает. На этот парадоксальный факт впервые обратил внимание адмирал О.С. Макаров в своем труде “Витязь” и Тихий океан” (1894 г.), написав, что река приводит в движение такое количество морской воды, которое в сто и более раз превосходит сток самой реки.

Согласно расчетам и данным измерений в полевых условиях и в экспериментальных лотках [5, 6], нарастание расхода смешанных вод в сторону водоема происходит почти зеркально (хотя и медленнее) по сравнению с уменьшением скорости

течения (формула (5)). Аналогично возрастает вдоль зоны смешения соленость воды.

## 2. Вертикальное перемешивание вод в устьях рек.

При исследовании стратификации и вертикального перемешивания вод [5–8, 11, 14, 16, 23] приняты подходы, разработанные для устьев рек в Западной Европе и США [4, 28, 30–32]. В качестве формального показателя степени стратификации и вертикального перемешивания вод в устьях рек используют так называемый параметр стратификации  $n = \Delta S / S_{\text{ср}}$ , где  $\Delta S = S_{\text{дно}} - S_{\text{пов}}$ ,  $S_{\text{ср}} = 0.5(S_{\text{дно}} + S_{\text{пов}})$ ,  $S_{\text{дно}}$  и  $S_{\text{пов}}$  – соленость воды у дна и на поверхности. Выделяют три основных типа стратификации и перемешивания вод: I – слабая стратификация и полное (хорошее) перемешивание ( $0 < n < 0.1$ ); II – умеренная стратификация и частичное перемешивание ( $0.1 < n < 1.0$ ); III – сильная стратификация ( $1.0 < n < 2.0$ ) и либо клин осолоненных вод у дна, либо тонкий слой пресной воды у поверхности, как во многих фиордах. Согласно [28, 30], на характер вертикального перемешивания заметное влияние оказывают внешние факторы: на ослабление перемешивания (сдвиг его типа к III) влияет увеличение водного стока реки, на активизацию перемешивания (сдвиг в сторону типа I) – усиление воздействия приливов и волнения.

М.В. Михайлова в [23] на основе опубликованных в зарубежной литературе данных наблюдений за изменением поля солености в устьях Роны, По, Тибра, Фрейзера, Колумбии в целом подтвердила сделанные ранее выводы и частично уточнила их. В частности, в [23] показано, что при сизигийных приливах вертикальное перемешивание вод сильнее, а стратификация вод слабее, чем в квадратуру.

Помимо параметра  $n$ , в качестве показателей процесса смешения вод по вертикали применяют приливный параметр Симмонса  $\alpha = W_Q / P_t$ ,  $W_Q$  – объем стока воды реки за приливный цикл,  $P_t$  – объем приливной призмы, а также ряд следующих гидрофизических критериев:

плотностное число Фруда

$$Fr_p = V / \sqrt{\frac{\Delta \rho}{\rho_{\text{ср}}} gh}, \quad (6)$$

$V$  – средняя скорость речного потока,  $h$  – глубина русла,  $\Delta \rho$  – разность плотностей морской  $\rho_m$  и речной  $\rho_p$  воды,  $\rho_{\text{ср}} = 0.5(\rho_m + \rho_p)$ ;

эстуарное число Ричардсона;

слоевое число Ричардсона и др.

Сводка количественных значений перечисленных показателей, параметров и критериев для разных типов вертикального перемешивания приведены в [5, 6, 8].

## 3. Проникновение морских вод в реки и рукава дельт.

В условиях антропогенного сокращения водного стока многих рек и ускоряющегося повышения уровня океанов и морей актуальным становится исследование процессов проникновения в устья рек осолоненных вод и разработка мер борьбы с этим негативным событием. М.В. Михайловой проведен анализ этих процессов на примере дельт Яны, Индигирки, Дуная, Тибра, Роны, По, Луары, Меконга, Колвилла, Ориноко. При этом использованы два метода анализа и расчета [16, 23]: 1) эмпирический, заключающийся в построении по данным наблюдений продольных профилей солености воды в разные фазы водного режима реки и прилива и графиков зависимости между дальностью проникновения осолоненных вод  $L_S$  и расходом воды реки (рукава)  $L_S = aQ^{-m}$  или  $L_S = b(Q_{\text{кр}} - Q)^n$ ,  $Q_{\text{кр}}$  – расход воды, при котором начинается проникновение морских вод; 2) полутеоретический, использующий формулу Кейлегана:

$$L_S / h = c Fr_p^{-p}, \quad (7)$$

$Fr_p$  – плотностное число Фруда по формуле (6). Структура формулы (7) указывает на то, что дальность проникновения осолоненных вод в устья рек должна увеличиваться при уменьшении скорости течения в речном потоке и увеличении глубины в результате как искусственного углубления русла или устьевого бара, так и повышения уровня моря. Значения эмпирических параметров во всех приведенных выше формулах подбираются по данным наблюдений. В [23] приведены сведения о величинах  $L_S$  и  $Q_{\text{кр}}$  в устьях ряда отечественных и зарубежных рек.

### Морфологические процессы

#### 1. Процессы дельтоформирования.

При изучении закономерностей формирования речных дельт получены существенные результаты:

Предложено подразделение процессов дельтоформирования на части, отличающиеся характером процесса и его продолжительностью: эпохи дельтоформирования, соответствующие крупномасштабным морским регрессиям и трансгрессиям; стадии формирования сначала дельты выполнения, а затем дельты выдвигания в периоды замедления повышения уровня моря и его стабилизации; фазы малорукавной, многорукавной и вновь малорукавной дельты на обеих стадиях [6, 8, 14]. Выделено также два типа дельтоформирования: медленного эволюционного, заключающегося в чередующемся выдвигании в море крупных дельтовых лопастей (как в дельтах Волги, Лены, По, Роны и др.), и быстрого, скачкооб-

разного, с прорывами и полной перестройкой гидрографической сети дельты [20]. Процессы второго типа включают в себя несколько этапов [6, 8, 18, 20, 21, 25, 26]. Такие процессы до антропогенного сокращения стока наносов рек происходили в очень изменчивых дельтах Амударьи, Или, Куры, Сулака [25, 26], а также Хуанхэ, Миссисипи, Годавари. В настоящее время развитие дельты с прорывами может случиться только в устье Терека [25].

Выявлены особенности морфометрии дельт выполнения и выдвигания [21, 22], заключающиеся в различиях связей между разными характеристиками дельт обоих типов. В [22] приведена сводка морфометрических характеристик 16 дельт выполнения и 42 дельт выдвигания в устьях рек России и зарубежных стран. В [21] опубликованы сведения о многолетних изменениях многих дельт выдвигания. Полученные результаты могут быть использованы для приближенной оценки возможного изменения речных дельт в условиях ожидаемых изменений стока воды и наносов рек и уровня морей.

Разработан балансовый подход в изучении изменений дельт выдвигания [6, 19]. Предложено, в частности, приближенное уравнение баланса наносов в объемных единицах за интервал времени  $\Delta t$  (годы) в условиях относительно стабильного уровня моря

$$\Delta V_{\text{кв}} = \Delta L_{\text{д}} h_{\text{взм}} B_{\text{мкд}} = k W_R \Delta t / \rho_{\text{отл}} - V_{\text{в}}, \quad (8)$$

$\Delta V_{\text{кв}}$ ,  $\Delta L_{\text{д}}$  – изменения объема устьевого конуса выноса и длины дельты за период  $\Delta t$ ;  $h_{\text{взм}}$  – глубина взморья;  $B_{\text{мкд}}$  – длина МКД;  $W_R$ , млн т/год – сток наносов реки;  $\rho_{\text{отл}}$  – плотность дельтовых отложений;  $k$  – доля дельтоформирующих наносов в величине  $W_R$  (обычно от 0.3 до 0.5);  $V_{\text{в}}$  – объем наносов, уносимых волнением за пределы устья реки.

На основе рассматриваемого подхода и уравнения (8) разработан приближенный метод расчета “критического” стока наносов реки  $W_{R \text{ кр}}$ , при котором дельта перестает выдвигаться в море и тенденция ее развития сменяется на отступление и деградацию. Из компонентов уравнения (8) измерить можно лишь морфометрические характеристики и величину  $W_R$ . Поэтому выражение (8) необходимо привести к эмпирической формуле, рассчитываемой аналитически или графически для каждой конкретной дельты  $\Delta L_{\text{д}}/\Delta t = aW_R - b$ , откуда при условии  $\Delta L_{\text{д}}/\Delta t = 0$  можно рассчитать “критическое” значение  $W_R = b/a$ . Метод применен к дельтам Нила, Годавари, Дуная и Хуанхэ. Для первых двух стоков наносов рек стал меньше “критического” еще в середине XX в. после сооружения на реках крупных водохранилищ, а для двух последних – антропогенное уменьшение  $W_R$

и выход дельт на большие морские глубины приблизили их к началу размыва и деградации.

Разработан метод оценки степени затопления дельты при значительном повышении уровня моря и антропогенном сокращении стока наносов реки [14, 16, 19]. Метод основан на предложенной В.Н. Михайловым концепции подпорной призмы, возникающей в приморской зоне дельты в результате повышения уровня моря на  $\Delta H_{\text{м}}$ . Объем этой призмы равен

$$V_{\text{пп}} 0.5 \Delta H_{\text{м}}^2 B_{\text{мкд}} / i_{\text{д}}, \quad (9)$$

$i_{\text{д}}$  – уклон поверхности приморской зоны дельты. Степень затопления дельты будет зависеть от соотношения объема  $V_{\text{пп}}$  и стока дельтоформирующих наносов  $\Sigma k W_R / \rho_{\text{отл}}$  за период подъема уровня моря. Если  $V_{\text{пп}}$  больше стока наносов, то часть дельты (как в устьях Урала, Сулака, Куры в период повышения уровня Каспийского моря на 2.35 м в 1978–1995 гг.) будет затоплена, а площадь всей дельты уменьшится [25]. Если же сток наносов больше  $V_{\text{пп}}$ , то дельта будет наращиваться в высоту и медленно выдвигаться в море, несмотря на рост его уровня (как в устье рук. Каргалинский Прорыв в дельте Терека [25]).

## 2. Русловые процессы в рукавах дельт.

С целью изучения руслowych процессов и динамики изменчивой русловой сети дельт разработана концепция динамически устойчивого русла рукавов дельт [6, 16]. Суть концепции состоит в следующем. Предполагается, что в результате взаимного приспособления потока и русла эрозионно-аккумулятивные процессы стремятся сформировать динамически устойчивое русло, в котором направленные (необратимые) деформации не происходят, а возможны лишь знакопеременные (обратимые) изменения (например, смещение донных гряд). На основе обработки обширного материала измерений в неприливных дельтах Енисея, Печоры, Оби, Лены, Волги, Дуная, Кубани, Куры, Терека, Амударьи получены связи вида

$$\begin{aligned} B_0 &= K_B Q_{\text{ф}}^{1/2}, \quad h_0 = K_h Q_{\text{ф}}^{1/3}, \\ V_0 &= K_V Q_{\text{ф}}^{1/6}, \quad I_0 = K_I Q_{\text{ф}}^{-1/9}, \end{aligned} \quad (10)$$

где  $B_0$ ,  $h_0$ ,  $V_0$  и  $I_0$  – мало изменяющиеся, т.е. условно устойчивые, ширина, средняя глубина русла, средняя скорость течения, уклон водной поверхности рукавов при руслоформирующих расходах воды в рукавах  $Q_{\text{ф}}$ , соответствующих среднему максимальному расходу воды реки в вершине дельты в период половодья. Структура формул (10) получена теоретически, а коэффициенты  $K$  найдены путем обработки данных измерений и оказались индивидуальными для каждой из упомянутых дельт и зависящими от концентрации

наносов в реке в период половодья (чем она больше, тем  $K_B$  и  $K_h$  меньше, а  $K_V$  и  $K_I$  — больше [6].

Формулы (10) названы гидролого-морфометрическими зависимостями; они были применены для оценки тенденции развития рукавов в конкретных дельтах. Эта оценка строилась на сравнении фактических характеристик рукавов  $B$ ,  $h$ ,  $V$  и  $I$  с их устойчивыми значениями согласно формулам (10). Признаками тенденции рукава к активизации (размыву) служат соотношения  $B < B_0$ ,  $h < h_0$ ,  $B/h < B_0/h_0$ ,  $V > V_0$  и  $I > I_0$ ; соотношения с противоположными знаками — признак потерь рукавом активности и тенденции к заилению и отмиранию [6, 16].

Предложены четыре типовые схемы русловых деформаций в отдельных дельтовых рукавах: при неизменном уровне моря, при его повышении и понижении в условиях как приглубого, так и очень отмелого взморья [6, 14, 16, 19, 25].

Русловые процессы в многорукавных системах дельт значительно сложнее. В таких случаях приходится рассматривать не только изменения морфометрических характеристик рукавов, но и сопутствующее им перераспределение стока по рукавам. Наиболее часто происходит следующее: стремясь к достижению устойчивого состояния, русло с увеличивающимся расходом воды начинает размываться. Это ведет к уменьшению его гидравлического сопротивления и дальнейшему увеличению расхода воды. Смежный рукав, наоборот, теряет свой сток и начинает заиливаться. В результате начавший активизироваться рукав продолжает размываться, а уменьшивший свой сток — заиливаться. Этот процесс продолжается до полного переключения стока в первый рукав и отмирания второго. Интенсивность этого процесса тем больше, чем больше сток наносов реки. Таким образом, многорукавные системы в дельтах, особенно в активно развивающихся, обычно недолговечны. В очень редких случаях возможно временное (“конкурирующее”) развитие смежных рукавов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В последние полвека гидрология устьев рек как наука добилась крупных научных и практических результатов; в Европе и США — в основном при изучении эстуариев, в России — при изучении дельт. Несмотря на эти достижения, требования к гидрологии устьев рек возрастают. Объясняется это следующим: 1) устья рек, особенно в современных условиях, — одни из самых изменчивых и экологически уязвимых географических объектов; 2) хозяйственное освоение их богатых природных ресурсов постоянно расширяется и поэтому нуждается в научном обосновании. Кроме того, требует решения ряд проблем, возникаю-

щих при одновременном использовании водных, земельных, биологических и других ресурсов устья реки разными отраслями хозяйства. К таким проблемам относятся, например, противоречия между водным транспортом, коммунальным хозяйством, нефтегазовым комплексом, с одной стороны, и требованиями охраны природы — с другой; между сельским и рыбным хозяйством; между потребностями сельского хозяйства в многоводный период (защита от наводнений) и во время засухи (необходимость в большом водозаборе для орошения земель).

Наиболее актуальные задачи современной гидрологии устьев рек следующие.

1. Разработка прогноза возможных в XXI в. изменений строения, режима и экологических условий устьев рек под воздействием ожидаемых естественных и антропогенных изменений стока воды и наносов рек и повышения уровня Мирового океана и связанных с ним морей. Прогноз затопления и деградации дельт в результате повышения уровня моря и антропогенного сокращения стока наносов рек.

2. Разработка комплекса усовершенствованных методов анализа, расчета и прогноза гидрологических характеристик устьев рек. Важной частью такого комплекса методов должна стать гидролого-морфологическая математическая модель развития русловой сети дельты, одновременно учитывающая взаимовлияющие русловые процессы в рукавах и перераспределение стока между ними.

3. Исследование воздействия на устья рек опасных гидрологических событий (в том числе наводнений как речного, так и морского происхождения).

4. Разработка комплекса универсальных научных рекомендаций по рациональному использованию и охране природных ресурсов устьев рек. В частности, должны быть разработаны рекомендации по преодолению противоречий в требованиях различных отраслей хозяйства. Одним из возможных компромиссов может стать принцип “зонирования” устьев рек, т. е. разделение их площади под нужды разных потребителей.

При дальнейшем изучении устьев рек России (помимо решения перечисленных выше общенаучных задач) необходимо уделить особое внимание следующему: 1) более широкому внедрению постоянно действующего мониторинга гидрологического и экологического состояния устьев важнейших рек России с применением усовершенствованных приборов и наземных и дистанционных методов; 2) расширению исследований в устьях рек Российской Арктики, в первую очередь их ледового режима, в связи с потеплением климата; 3) дальнейшему изучению изменения строения и режима устьев рек, выпадающих в Кас-

пийское море в условиях начавшегося в конце XX в. нового понижения его уровня; 4) изучению еще недостаточно исследованных приливных эстуариев в устьях рек России, в особенности на примере эстуариев на Камчатке и в Приморье.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горин С.Л. Эстуарии полуострова Камчатка: теоретические подходы к изучению и гидролого-морфологическая типизация. Итоги 10 лет исследований // Иссл. вод. биол. ресурсов Камчатки и северо-западной части Тихого ок. 2012. № 27. С. 5–12.
2. Кортаев В.Н. Очерки по геоморфологии устьевых и береговых систем. Избранные труды. М.: Геогр. ф-т МГУ, 2012. 493 с.
3. Кравцова В.И., Митькиных Н.С. Устья рек России. Атлас космических снимков. М.: Науч. мир, 2013. 122 с.
4. Мак-Дуэлл Д.М., О'Коннор Б.А. Гидравлика приливных устьев рек. М.: Энергоатомиздат, 1983. 312 с.
5. Михайлов В.Н. Гидрологические процессы в устьях рек. М.: ГЕОС, 1997. 175 с.
6. Михайлов В.Н. Гидрология устьев рек. Учебник. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1998. 176 с.
7. Михайлов В.Н. Динамика потока и русла в неприливных устьях рек. М.: Гидрометеиздат, 1971. 259 с.
8. Михайлов В.Н. Закономерности устьевых процессов // Закономерности гидрологических процессов. М.: ГЕОС, 2012. С. 609–686.
9. Михайлов В.Н. Место устьев рек в природной среде и их роль в глобальных гидрологических процессах // Уч. зап. РГГМУ. 2007. № 5. С. 98–104.
10. Михайлов В.Н. Устья рек России и сопредельных стран: прошлое, настоящее и будущее. М.: ГЕОС, 1997. 413 с.
11. Михайлов В.Н., Горин С.Л. Новые определения, районирование и типизация устьевых областей рек и их частей – эстуариев // Вод. ресурсы. 2012. Т. 39. № 3. С. 243–257.
12. Михайлов В.Н., Добролюбов С.А. Гидрология. Учебник. М.: Директ-Медиа, 2017. 751 с.
13. Михайлов В.Н., Михайлова М.В. Влияние местных водохозяйственных и гидротехнических мероприятий на речные дельты // Вод. ресурсы. 2015. Т. 42. № 3. С. 249–259.
14. Михайлов В.Н., Михайлова М.В. Влияние многолетних изменений морских факторов на устья рек // Вод. ресурсы. 2015. Т. 42. № 4. С. 367–379.
15. Михайлов В.Н., Михайлова М.В. Дельты как индикаторы естественных и антропогенных изменений режима рек и морей // Вод. ресурсы. 2003. Т. 30. № 6. С. 655–666.
16. Михайлов В.Н., Михайлова М.В. Физические основы гидрологических и морфологических процессов в речных дельтах // Вестн. РФФИ. 2013. № 2 (78). С. 26–33.
17. Михайлов В.Н., Михайлова М.В., Магрицкий Д.В. Основы гидрологии устьев рек. Учебник. М.: Триумф, 2018.
18. Михайлов В.Н., Рогов М.М., Чистяков А.А. Речные дельты. Гидролого-морфологические процессы. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 280 с.
19. Михайлова М.В. Баланс наносов в устьях рек и формирование дельт при повышении и понижении уровня моря // Вод. ресурсы. 2006. Т. 33. № 5. С. 567–579.
20. Михайлова М.В. Закономерности скачкообразного развития дельт // Вод. ресурсы. 2021. Т. 48. № 6. С. 676–684.
21. Михайлова М.В. Многолетние изменения строения речных дельт // Вод. ресурсы. 2016. Т. 43. № 5. С. 488–501.
22. Михайлова М.В. Морфометрия речных дельт // Вод. ресурсы. 2015. Т. 42. № 1. С. 45–55.
23. Михайлова М.В. Процессы проникновения морских вод в устья рек // Вод. ресурсы. 2013. Т. 40. № 5. С. 439–455.
24. Полонский В.Ф., Луначев Ю.В., Скриптунов Н.А. Гидролого-морфологические процессы в устьях рек и методы их расчета (прогноза). СПб.: Гидрометеиздат, 1992. 383 с.
25. Устья рек Каспийского региона: история формирования, современные гидролого-морфологические процессы и опасные гидрологические явления. М.: ГЕОС, 2013. 702 с.
26. Эстуарно-дельтовые системы России и Китая: гидролого-морфологические процессы, геоморфология и прогноз развития. М.: ГЕОС, 2007. 445 с.
27. Deltas: Models for Exploration. Houston Geol. Society. 1975. 555 p.
28. Dyer K.R. Estuaries. A physical introduction. Chichester: John Wiley & Sons, 1997. 195 p.
29. Geomorphology and sedimentology of estuaries. Amsterdam: Elsevier Sci. BV, 1996. 471 p.
30. Officer Ch.B. Physical oceanography of estuaries (and associated coastal waters). N.Y.: John Wiley and Sons, Inc., 1976. 465 p.
31. Prandle D. Estuaries: Dynamics, mixing, sedimentation and morphology. N.Y.: Cambridge Univ. Press, 2009. 238 p.
32. Savenije H.H. Salinity and tides in alluvial estuaries. Amsterdam: Elsevier, 2005. 197 p.
33. Syvitski J.P.M., Kettner A.J., Overeem I., Hutton E.W.H., Hannon M.T., Brakenridge G.R., Day J., Vörösmarty C.J., Saito Y., Giosan L., Nicholls R.J. Sinking delta // [http://darchive.mblwhoilibrary.org/bitstream/handle/1912/3207/SyvitskiDeltas\\_Paper.pdf?sequence=1](http://darchive.mblwhoilibrary.org/bitstream/handle/1912/3207/SyvitskiDeltas_Paper.pdf?sequence=1)
34. Wright L.D. River deltas // Coastal Sedimentary Environments. N.Y.: Springer-Verlag, 1978. P. 5–68.