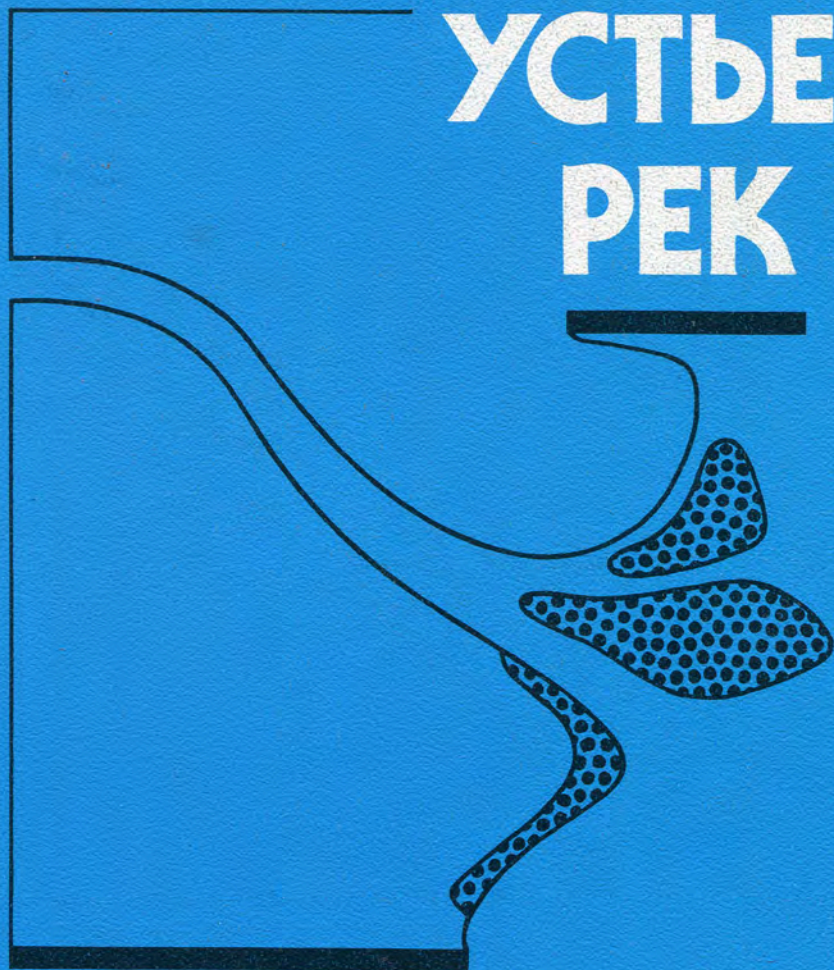


В. Н. Михайлов

ГИДРОЛОГИЯ УСТЬЕВ РЕК



Издательство
Московского университета

В. Н. Михайлов

ГИДРОЛОГИЯ УСТЬЕВ РЕК

Рекомендовано Министерством общего и профессионального образования Российской Федерации в качестве учебника для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению «Гидрометеорология», специальности «Океанология»

Дурылову
Андрею Алексеевичу
Гусьякову

с наилучшими пожеланиями
от автора

Владимиру

5 янв. 1999

Издательство
Московского университета
1998

УДК 551.482.6
ББК 26.222.5
М 69

Рецензенты:

кафедра океанологии Дальневосточного государственного университета (ДВГУ),
кафедра гидрологии суши ДВГУ; профессор Н. Б. Барышников.

Учебник подготовлен и издан в рамках проекта «Морские устья рек» подпрограммы «Комплексные исследования океанов и морей, Арктики и Антарктики» Министерства науки и технологий Российской Федерации

Михайлов В.Н.

М. 69 Гидрология устьев рек: Учебник. — М: Изд-во МГУ, 1998. — 176 с.: ил.

ISBN 5-211-03807-X

В учебнике излагаются основы гидрологии устьев рек — науки, изучающей эти очень изменчивые и экологически уязвимые природные объекты.

Показаны особенности гидрологических процессов в устьях рек разного типа, в том числе дельтовых и эстуарных. Рассмотрены их водный, ледово-термический и гидрохимический режимы; процессы динамического взаимодействия и смешения речных и морских вод; процессы дельтообразования.

Показаны глобальная роль устьев рек в качестве природных «барьеров», последствия хозяйственной деятельности в бассейнах рек и повышения уровня Мирового океана для режима дельт и прибрежной зоны морей. Изложены научные основы рационального использования и охраны природных ресурсов устьев рек, их гидролого-экологического мониторинга.

Для студентов географических факультетов университетов и других вузов, обучающихся по специальностям «гидрология» и «океанология», также студентов-геоморфологов и специалистов в области рационального использования и охраны природных ресурсов.

Mikhailov V.N.

Hydrology of river mouths: Textbook. — Moscow University Press, 1998. — 176 p.

The textbook presents principals of river mouth hydrology as science, studying these very changeable and vulnerable natural objects.

In the textbook features of hydrological processes at river mouths of different types, including deltaic and estuarine, have been demonstrated. Water, termic, ice and hydro-chemical regimes, processes of dynamic interaction and mixing of river and sea waters, delta formation processes are considered.

A global role of river mouths as natural "barriers", consequences of human activity in river basins and sea level rise for regime of deltas and nearshore zones of seas are shown. Scientific bases for rational use and protection of natural resources of river mouths and their hydrological-ecological monitoring are described.

The textbook is intended for students of geographical faculties of universities and other institutions, which specialise in hydrology and oceanology. It also can be useful for students learning in geomorphology and specialists in the field of rational use and protection of natural resources.

УДК 551.482.6

ББК 26.222.5

ISBN 5-211-03807-X

© Михайлов В.Н., 1998

ВВЕДЕНИЕ

Студенты, обучающиеся на географических факультетах университетов и в некоторых технических вузах по специальностям «гидрология» и «океанология», в рамках ряда дисциплин знакомятся с основами гидрологии устьев рек как науки, пограничной между гидрологией суши и океанологией. Здесь студенты должны получить представление об устьевых областях рек как о районах взаимодействия рек и морей, уяснить основные закономерности гидрологических процессов в устьях рек как основы формирования специфического природного комплекса этих объектов.

Систематизированное изложение этих вопросов в изданных ранее учебниках и учебных пособиях по гидрологии суши и океанологии отсутствует. Специальных учебных пособий по гидрологии устьев рек пока не издано. Научные монографии и руководства, излагающие основы гидрологии устьев рек [22—25, 27, 32—35, 39 и др.], не вполне пригодны для учебных целей.

В то же время значение гидрологических знаний об устьях рек при подготовке специалистов гидрологов и океанологов возрастает, что связано с повышением интереса к изучению этих объектов. Это в свою очередь объясняется двумя обстоятельствами. Во-первых, расширяется использование богатых природных ресурсов устьев рек различными отраслями хозяйства — сельским и рыбным, речным и морским водным транспортом, гидроэнергетикой (сооружение приливных электростанций), целлюлозной промышленностью и др. Во-вторых, в последнее время обострилась проблема охраны природных ресурсов устьев рек от истощения и загрязнения. Выявилась большая роль устьев рек как исключительно биологически продуктивных районов в поддержании экологического равновесия на обширных сопредельных территориях суши и акваториях морей. Остроту в проблему охраны устьев рек добавила выявившаяся в последнее время сильная подверженность этих природных объектов влиянию естественных и особенно антропогенных изменений стока рек, режима морей, качества вод. Обнаружено, что в устьях рек часто происходят негативные изменения режима и других природных условий (осыхание прибрежных земель, осолонение и загрязнение вод и пр.) более сильные, чем в реках и морях. Без прогноза последствий для природы устьев рек в настоящее вре-

мя невозможно крупномасштабное использование водных ресурсов. Более того, во многих случаях устья рек превращаются в объекты, лимитирующие водохозяйственные мероприятия в речных бассейнах.

Устьевые области рек (устья рек), включая дельты, эстуарии и прилегающие, подверженные влиянию речного стока участки прибрежной зоны морей, занимая промежуточное положение между речными бассейнами и водоемами (океанами, морями, крупными озерами), представляют собой специфические «пограничные» геоэкосистемы, где взаимодействуют и трансформируются совершенно разные по физическим, динамическим, химическим и биологическим свойствам водные массы, присущие двум природным системам более высокого ранга — речным бассейнам и приемным водоемам. Это промежуточное положение устьев рек между реками и приморскими равнинами, с одной стороны, и прибрежной зоной океанов, морей, крупных озер, — с другой, определяет основные особенности природных условий — гидрологических, морфологических, ландшафтных, экологических — этих географических объектов. Как места взаимодействия рек и приемных водоемов устья рек, с одной стороны, перенимают черты, присущие этим объектам, а с другой — приобретают новые свойства, превращающие устьевые области в действительно специфические и уникальные природные объекты.

На долю устьев рек приходится относительно небольшая площадь земной поверхности. Площадь всех дельт мира не намного превышает 3% площади суши, а на долю дельтовых берегов приходится около 9% длины береговой линии океана [20]. Площадь всех эстуариев мира составляет менее 0,4% акватории Мирового океана [36]. Однако благодаря своему географическому положению и существенным природным особенностям устья рек занимают особое место среди других географических объектов и приобретают важнейшее экологическое и экономическое значение.

Устья рек обладают богатейшими природными ресурсами — водными, земельными, биологическими. Обилие воды создает предпосылки для развития богатой жизни, речные и морские течения доставляют в устье реки плодородный ил, питательные вещества, растворенный кислород, тепло. Большинство дельт имеет весьма плодородные почвы, способствующие бурному развитию растительности. Эстуарии обладают самой высокой удельной биопродуктивностью из всех экосистем на планете и дают более 4% всей первичной продукции океана; в эстуариях сосредоточено более 1/3 общей растительной массы Мирового океана [36]. Экологическая роль устьев рек выходит далеко за

границы этих объектов на сопредельные участки территории суши и акватории морей. Дельты рек — районы нереста многих видов рыб; эстуарии и приустьевые прибрежные воды служат местом откорма многих морских промысловых видов; через дельты проходят пути миграции проходных и полупроходных рыб; во многих дельтах зимуют перелетные птицы.

Благодаря природным богатствам дельты крупных рек (Хуанхэ, Янцзы, Нила, Инда, Ганга, Меконга, Амударьи) стали одними из древнейших очагов орошаемого земледелия и человеческой цивилизации в целом. Многие устья рек стран СНГ (Волги, Кубани, Дона, Терека, Дуная, Днепра, Амударьи и др.) и в наши дни являются крупными центрами сельскохозяйственного производства и рыбного промысла. Благодаря выгодному географическому положению между реками и морями многие устья рек стали местом расположения крупных морских портов и городских центров (Роттердам, Лондон, Гамбург, Нью-Йорк, Новый Орлеан, Санкт-Петербург, Архангельск, Астрахань, Измаил, Херсон, Николаев, Дудинка, Николаевск-на-Амуре и многие другие). Дельты рек — одни из самых густонаселенных районов мира. Огромные массы населения в своей жизни и деятельности связаны с устьями рек и использованием их ресурсов (в США эта цифра, например, достигает 50 млн человек).

Большая экологическая роль устьев рек и их экономическая ценность делают изучение этих объектов важной задачей географии и экологии.

Освоение природных ресурсов устьев рек требовало изучения этих объектов. Еще в Древнем Египте в дельте Нила появились первые водомерные посты — «ниломеры». Географы древности — Геродот, Страбон, Птолемей — изучали устья Нила и Дуная. Многие устья рек были открыты и описаны известными мореплавателями, путешественниками, землепроходцами.

На фоне мировой изученности устьев рек как специфических географических объектов достижения российской науки, особенно в части изучения гидрологических и геоморфологических характеристик дельт, выглядят приоритетными.

В России первые серьезные исследования устьев рек были проведены в конце XIX — начале XX в. известными естествоиспытателями Н.Я. Данилевским и В.В. Докучаевым, а также океанологами С.О. Макаровым и Ю.М. Шокальским.

В первой половине нынешнего века стало ясно, что изучение устьев рек как очень сложных природных объектов возможно лишь на междисциплинарном уровне.

Первым в России сформировалось геолого-геоморфологическое направление в изучении устьев рек, делающее упор пре-

жде всего на геологию, тектонику, стратиграфию дельтовых отложений и геоморфологию речных дельт. Это направление продолжало и развивало положения геологии дельт, которые были заложены за рубежом Г. Кренднером, Ф. Гулливером, Дж. Баррелом, Р. Расселом и др. Основной вклад в развитие этого направления в 40—50-х гг. в России внесли М.В. Кленова, Д.В. Наливкин, Л.В. Пустовалов, Н.И. Николаев, И.С. Шукин, Н.И. Маккавеев, В.П. Зенкевич, О.К. Леонтьев.

Приблизительно в это же время усилиями В. А. Ковды и В. В. Егорова было создано второе направление в изучении устьев рек — почвоведение дельт.

Однако наиболее обширным и продуктивным стало третье направление в исследовании устьев рек — гидрологическое. Это не было случайным, поскольку, как постепенно выяснилось, именно гидрологические процессы оказываются ведущими в формировании природного комплекса устьев рек.

Первыми работами этого направления были исследования Н.С. Лелявского, В.Г. Глушкова, П.С. Чеховича, В.Е. Ляхницкого, В.В. Валединского, Б.А. Аполлова и Т.Н. Марютина. Большинство из этих работ было выполнено в первой половине XX в. в связи с гидрологическим обоснованием улучшения судоходных условий в устьях рек Волги, Днепра, Дуная, Сев. Двины и др.

Существенным вкладом в развитие гидрологического направления явилась монография И.В. Самойлова «Устья рек», изданная в 1952 г. [35]. В этой книге подведены итоги исследования устьев рек по состоянию на 40—50-е гг. Здесь впервые рассмотрен комплекс гидролого-географических закономерностей формирования устьев рек. Такой комплексный и географический подход стал позже традиционным для российской школы гидрологического изучения устьев рек.

В самостоятельную отрасль гидрологии, находящуюся между гидрологией рек и океанологией, гидрология устьев рек оформилась в 50—70-х гг. нынешнего столетия. В эти годы в Государственном океанографическом институте (ГОИН) системы гидрометслужбы сформировалось первое научное подразделение устьевиков-гидрологов, а на местах (в устьях крупнейших рек СССР — Волги, Терека и Сулака, Куры, Дуная, Днепра и Южного Буга, Дона, Кубани, Даугавы, Невы, Сев. Двины, Печоры, Амура, Амударьи) была создана сеть специализированных устьевых гидрометеорологических станций (позже некоторые из них были преобразованы в гидрометобсерватории). Хорошо продуманная и централизованная система исследований устьев рек СССР была создана в очень короткие сроки с двумя основными

целями: во-первых, для изучения еще слабо исследованных гидролого-географических условий устьев рек и определяющих их процессов, а во-вторых, для удовлетворения быстро растущих запросов народного хозяйства по комплексному использованию и охране водных ресурсов устьев рек, в частности, по научному обеспечению сельскохозяйственных и рыбохозяйственных мероприятий устьев рек Волги, Терека, Кубани, Дона, Днепра, Дуная, Амударьи и др. Созданная в 60—70-х гг. государственная служба исследования устьев рек СССР под руководством ГОИНа — явление уникальное. Такой эффективной службы не имело ни одно государство мира. Достоинно большого сожаления, что в связи с распадом СССР эта всесоюзная система нарушена, а в России она испытывает большие трудности из-за недостатка средств.

В процессе создания этой службы выяснилось, что методы гидрологии рек и океанологии в чистом виде при исследовании устьев рек неприменимы. Это потребовало разработки и апробации в полевых условиях комплекса специальных методик устьевых исследований [32—34], а также принципиально новых методов расчетов [23—25, 27, 34].

Инициаторами создания в системе гидрометслужбы нового научного направления и проведения соответствующих серьезных организационных мер были Н.Н. Зубов, И.В. Самойлов, А.А. Юшак, С.С. Байдин, В.С. Антонов.

Наиболее важные исследования устьев рек проведены в последние 30—40 лет.

В бассейне Каспийского моря наилучшим образом исследованы устья Волги [4, 5, 24, 27, 40]¹, Терека и Сулака [1, 6, 7, 19], Куры [1, 12]; в бассейне Черного и Азовского морей — устья Днепра и Южн. Буга [16, 21], Дуная [11, 24, 27], Дона [31, 37], Кубани [8, 24, 37, 38, 45]. Проведены исследования устьев рек, впадающих в Балтийское море, — Невы [13] и Даугавы (Зап. Двины) [19]. На российском севере изучались устья Сев. Двины [14], Оби [3], Лены [2, 20], Яны [20]. Крупные работы были посвящены устью Амударьи (Аральское море) [24, 28, 30].

Кроме названных работ следует упомянуть и ряд других, в которых обобщены результаты исследований устьев рек бывшего СССР [1, 9, 18, 20, 24, 27, 35, 41].

За рубежами бывшего СССР наилучшим образом исследованы устья Дуная [26], Миссисипи [15, 46], Маккензи [50].

¹ Здесь и далее ссылки даются лишь на наиболее важные работы, в основном монографического характера.

Основное отличие направленности изучения устьев рек в бывшем СССР от аналогичных исследований в других странах заключается в следующем. В СССР сформировалась практически единая школа изучения устьев рек, особенность которой — комплексный подход, органично объединяющий гидрологические, геоморфологические и гидрохимические исследования. При этом в первую очередь изучались дельты рек, в том числе очень изменчивые, такие как дельты Амударьи, Терека, Или. Наибольший вклад в разработку теории устьевых процессов и методов их анализа и расчета внесли в СССР Государственный океанографический институт (ГОИН), Арктический и антарктический научно-исследовательский институт (АНИИ), региональные институты гидрометслужбы в Тбилиси, Баку, Ташкенте, Алма-Ате, Владивостоке, отделение ГОИНа в Севастополе, филиал АНИИ в Мурманске, географический факультет Московского университета, Институт водных проблем АН СССР (ныне РАН), Союзморниипроект [20, 23—25, 27, 32—34, 36, 39, 42—44]. Одними из важнейших приложений таких исследований были рекомендации по исследованию устьев рек (в основном в системе гидрометслужбы) [32—34] и удовлетворение потребностей водного транспорта [9, 20].

За рубежом (в США, Нидерландах, ФРГ и других странах) существует два довольно узких и изолированных друг от друга научных направления в изучении устьев рек: изучение гидродинамики эстуариев с акцентом на приливные явления и качество вод [10, 17, 22, 48, 51] и исследования динамики наносов и геолого-геоморфологических аспектов формирования дельт или дна эстуариев [15, 46, 47, 49].

К настоящему времени сформировались основные разделы гидрологии устьев рек как науки промежуточной между гидрологией рек, океанологией и флювиальной и морской геоморфологией.

В предлагаемом учебнике рассматриваются основные положения гидрологии устьев рек. Главная цель учебного пособия — изложить наиболее общие вопросы теории гидрологических процессов в устьях рек. Основное внимание уделено таким вопросам, как определение, типизация и районирование устьев рек; особенности динамики вод и наносов; закономерности смешения речных и морских вод; эрозионно-аккумулятивные (морфологические) процессы; экологические условия устьев рек.

При рассмотрении этих вопросов потребовалось систематизировать современные представления о процессах в устьях рек, унифицировать и уточнить ряд понятий, устранить имеющиеся

в научной литературе противоречия в толковании некоторых терминов. При написании пособия использован личный опыт автора, приобретенный при натурных и теоретических исследованиях устьев рек во время работы в ГОИНе и МГУ (некоторые результаты этих исследований изложены в [11, 19, 23—25, 32—34, 48]), а также при чтении в течение многих лет курсов лекций «Гидрология морей и устьев рек» и «Сток и устья рек» на кафедрах гидрологии суши и океанологии географического факультета МГУ.

При подготовке рукописи учебника к печати большую помощь оказали кандидаты географических наук Е.С. Повалишникова и М.В. Михайлова, которым автор выражает искреннюю благодарность.

Автор выражает глубокую признательность Управлению окружающей среды Миннауки России за финансовую помощь при издании учебника.

Глава 1. УСТЬЕВАЯ ОБЛАСТЬ РЕКИ КАК ОСОБЫЙ ГЕОГРАФИЧЕСКИЙ ОБЪЕКТ

1.1. Определение устьевой области реки. Устьевые процессы и факторы, их определяющие

Понятие «устье» означает в русском языке, по В.А. Далю, край отверстия, трубки; раструб, жерло и происходит от слова «уста» (рот человека). Аналогичный смысл имеет понятие «устье» и в других языках (в английском mouth — одновременно и рот, уста, и устье; в немецком münd — рот, уста, mündung — устье; во французском bouche — рот, уста, embouchure — устье).

Понятие «устье реки» как место впадения реки в океан, внутреннее или окраинное море, озеро, водохранилище, другую более крупную реку давно нашло применение в географии и широко используется как в отечественной, так и в зарубежной научной, учебной и справочной литературе.

Вместе с тем термин «устье реки» обладает большой неопределенностью, так как без дополнительного уточнения не ясно, относится ли он только к точке (створу) впадения реки в другой водоем или к некоторому протяженному в пространстве объекту и каковы границы этого объекта.

Вместо неопределенного понятия «устье реки» И. В. Самойлов [35] применительно к впадению крупной реки в море или большое озеро ввел понятие «устьевая область реки». При этом под устьевой областью реки понимается сложный географический объект, включающий как участок реки, так и часть моря.

К настоящему времени в гидрологической литературе сформировалось следующее определение устьевой области реки [23—24, 27, 43].

Устьевая область реки (устье реки) — это особый географический объект, охватывающий район впадения реки в приемный водоем (океан, море, озеро), обладающий специфическими строением, ландшафтом и режимом и формирующийся под воздействием устьевых процессов — динамического взаимодействия и смешения вод реки и приемного водоема, отложения и перераспределения речных и частично морских наносов, приводя-

щих к образованию устьевого конуса выноса, а нередко и дельты.

Предлагаемое определение устьевой области (устья) реки рекомендуется применять, во-первых, ко всем рекам, а не только к крупным, а во-вторых, к случаям впадения рек в любые приемные водоемы (кроме долинных водохранилищ), т. е. в океаны, моря, озера (как соленые и солоноватые, так и пресные). Понятие же «устье» рекомендуется применять либо в широком смысле как сокращенный вариант и полный синоним понятия «устьевая область» (необходимо обязательно говорить: «устье реки»), либо в узком смысле применительно к месту впадения любого водотока в другой водоток («устье притока», «устье рукава», «устье протока») или приемный водоем («устье рукава», «устье протока»), а также к месту выхода в открытое море из полужакрытого прибрежного водоема («устье лимана», «устье лагуны», «устье эстуария»).

Специфику устьевой области реки придает, во-первых, наличие приемного водоема, куда впадает река, а во-вторых, во многих случаях — существование в пределах устья особого объекта — *дельты*.

Основные особенности устьевой области реки как географического объекта следующие.

1. Устьевая область занимает часть нижнего течения реки (устьевой участок реки, включая дельту, если она имеется) и часть прибрежной зоны приемного водоема (устьевое взморье) с присущей им обычно весьма сложной и очень изменчивой гидрографической сетью. Эта гидрографическая сеть представлена совокупностью *водотоков* (река в пределах устьевого участка, дельтовые рукава и протоки, проливы, искусственные каналы и др.) и *водоемов* (дельтовые и придельтовые озера, болота, плавни; соленые марши, устьевые лиманы и лагуны, заливы-куты, открытая часть устьевого взморья и др.). На устьевом участке реки преобладает речной гидрологический режим, но активно влияет приемный водоем. На устьевом взморье преобладает гидрологический режим, свойственный приемному водоему, но активно влияет река.

2. В устьевой области реки преобладают аккумулятивные формы рельефа, низкие затопляемые водами реки, а иногда и приемного водоема, прибрежные пространства, сложенные взаимопроницаемыми толщами речных, морских и озерных отложений.

3. Устьевая область реки обычно имеет специфический почвенно-растительный покров с преобладанием болотных и луговых почв и водной или влаголюбивой растительности, своеобраз-

разную и богатую фауну (рыбы, птицы, пушной зверь и др.). Ландшафт участков суши в пределах устьевой области реки часто резко отличается от ландшафта окружающей местности и аazonален, особенно в географических зонах с недостаточным увлажнением (степи, полупустыни, пустыни).

Природный комплекс устьевой области реки, включая рельеф, гидрографическую сеть, ландшафт и режим, формируется под влиянием *устьевых процессов*. Основу этих процессов (как и в любых других водных объектах) составляет комплекс физических, химических, биохимических и биологических процессов, управляемых законами физики, химии, биохимии и биологии.

Устьевые процессы можно подразделить на следующие группы, виды и подвиды.

I. Физические процессы.

A. Динамика вод.

1. Динамическое взаимодействие вод реки и приемного водоема, включая формирование сопряжения реки и водоема в виде гидравлического подпора или спада; расплывание волн половодий и паводков; распространение вверх по устьевому участку волн приливов, нагонов и сгонов.

2. Втекание речных вод в приемный водоем и смешение речных и морских вод.

3. Растекание вод по поверхности дельты и ее водотокам.

4. Морские ветровые и приливные течения на устьевом взморье.

5. Ветровое волнение на устьевом взморье, в водоемах и водотоках дельты.

Б. Ледово-термические процессы на устьевом участке реки, в водоемах дельты и на устьевом взморье.

В. Динамика наносов на устьевом участке реки и устьевом взморье.

Г. Эрозионно-аккумулятивные (морфологические) процессы, включая формирование продольного профиля русла на устьевом участке реки; формирование дельты, ее гидрографической сети и морского края; русловые процессы в дельте; формирование дна устьевого взморья; эоловые процессы.

II. Химические процессы: формирование и трансформация химического состава вод без участия организмов.

III. Биохимические процессы: формирование и трансформация химического состава вод с участием организмов.

IV. Биологические процессы: формирование сообществ водной биоты, почвенно-растительного покрова и фауны поймы и дельты.

Из перечисленного обширного перечня устьевых процессов ведущими в формировании природного комплекса устьевой области реки служат динамика вод и наносов (IA, IB) и морфологические процессы (IG). Все остальные процессы развиваются на их фоне и при их сильном влиянии. Упомянутые ведущие процессы (IA, IB и IG) могут быть названы *гидролого-морфологическими устьевыми процессами*. Процессы, в первую очередь определяющие экологические условия устья реки (IA, IB, II, III, IV), могут быть названы *гидролого-экологическими*.

Характеризуя устья рек как особые природные объекты, необходимо упоминать о двух аспектах еще малоизученной функциональной роли устьевых областей рек в глобальных процессах взаимодействия вод суши и океана и в воспроизводстве органического вещества.

Во-первых, устьевые области рек выполняют роль природных «барьеров» (седиментологических, морфологических, геохимических и гидробиологических) между реками и морями. Здесь отлагается большая часть приносимых реками наносов; задерживаются и накапливаются растворенные в воде вещества, включая загрязняющие; химический состав вод быстро трансформируется из речного в морской; при солености воды 5—9‰ находится гидробиологическая граница между пресноводной, с одной стороны, и солоноватоводной и морской биотой — с другой.

Во-вторых, устьевые области рек благодаря обилию приносимых рекой биогенных веществ, подвижности вод, хорошо прогреваемому мелководью, особенностям солевого режима являются одними из наиболее биопродуктивных районов на Земле. Экологическая роль устьевых областей рек огромна и еще не до конца понята и изучена. Несомненно, что экологическое влияние небольших по площади устьевых областей рек распространяется далеко за их пределы — на обширные сопредельные территории суши и акватории морей.

Факторы, определяющие устьевые процессы, могут быть подразделены на две большие группы: природные (естественные) и антропогенные.

Природные факторы делятся, в свою очередь, на три вида.

1. Речные факторы: сток воды; уровни воды в реке, физические и химические свойства речной воды (температура, мине-

рализация, плотность, химический состав воды, концентрация загрязнений, содержание газов и др.); тепловой сток; ледовый режим; физико-механические свойства речных наносов (крупность, плотность, концентрация); сток взвешенных и влекомых наносов; русловые процессы в реке; речная биота.

2. Морские факторы: уровни воды в море; ветровое волнение; морские течения; физические и химические свойства морской воды (температура, соленость, плотность, химический состав, содержание газов и др.); ледовые явления; физико-механические свойства прибрежных наносов (крупность, плотность, концентрация); вдольбереговой поток наносов.

3. Местные физико-географические (ландшафтные) факторы:

а) факторы, практически не зависящие от современных устьевых процессов, — климатические и метеорологические (давление воздуха, ветер, температура воздуха, атмосферные осадки, испаряемость и испарение); геологическое строение (литология) подстилающих пород, многолетняя мерзлота, тектоника, проседание грунта (subsidence); коренной рельеф прилегающей части суши и моря;

б) факторы, зависящие от современных устьевых процессов, — вновь созданные аккумулятивные формы рельефа и гидрографическая сеть дельты, являющиеся продуктом устьевых процессов, но и оказывающие на них обратное влияние; почвенно-растительный покров, возникающий и развивающийся в процессе дельтообразования, но и оказывающий на гидрологическую морфологические устьевые процессы сильное обратное влияние (ослабление течений, задержка наносов, предохранение берегов от размыва и т.д.).

Антропогенные факторы подразделяются на оказывающие непосредственное и косвенное влияние на устьевые процессы. К первым относятся водохозяйственные и гидротехнические мероприятия, осуществляемые в пределах устьевой области (в основном в дельте), т. е. углубление, выправление, спрямление, перекрытие дельтовых водотоков, углубление и выправление устьевых баров, сооружение защитных молов в устьях водотоков, обвалование русел, сооружение судоходных, оросительных и осушительных каналов, вододелителей, шлюзов, противонагонных плотин (барьеров) и т. д. Ко вторым относятся хозяйственные мероприятия в бассейне реки, влияющие на уже упомянутые речные факторы устьевых процессов (это, например,

преобразование поверхности речного бассейна, регулирование и изъятие стока воды, антропогенное изменение стока наносов и т. д.).

Естественные и антропогенные изменения режима крупной реки могут оказать косвенное влияние на процессы в устьевой области этой же реки через изменения водно-солевого баланса и режима приемного водоема (изменение его уровня в случае бессточных озер типа Каспийского и Аральского морей, озера Балхаш, изменение солености вод водоема). На процессы в данной устьевой области могут повлиять естественные и антропогенные изменения режима других рек, впадающих в тот же приемный водоем. Например, изменения стока Волги сказываются на колебаниях уровня Каспийского моря, которые в свою очередь влияют не только на взморье и приморскую зону дельты Волги, но и на процессы в устьях рек Урала, Терека, Сулака и др.

Система факторов устьевых процессов и схема их взаимодействия показаны на рис. 1.

Изменчивость устьевых процессов, строения и режима устьевой области реки имеет своими причинами, во-первых, изменение перечисленных выше факторов (прежде всего речных и морских), а во-вторых, внутренние гидролого-морфологические процессы, свойственные устьевой области реки и, прежде всего ее дельте. И те и другие изменения обладают некоторыми типичными временными масштабами.

Основные виды изменчивости характеристик устьев рек следующие: геологического масштаба (длительность — десятки и сотни тысяч лет); вековые (сотни и тысячи лет); многолетние, связанные с климатическими причинами и хозяйственной деятельностью (от нескольких до сотен лет); сезонные, в основном определяемые внутригодовыми естественными и антропогенными колебаниями стока рек; кратковременные, связанные с полумесячными неравенствами приливов, синоптическими процессами (вызывающими паводки и сгонно-нагонные явления), суточными и полусуточными приливами, суточным ходом ветра и температуры воздуха и т. д.

1.2. Типизация устьевых областей рек

В географической, геоморфологической и гидрологической литературе содержится множество противоречащих друг другу классификаций устьев рек и их частей — дельт и эстуариев.

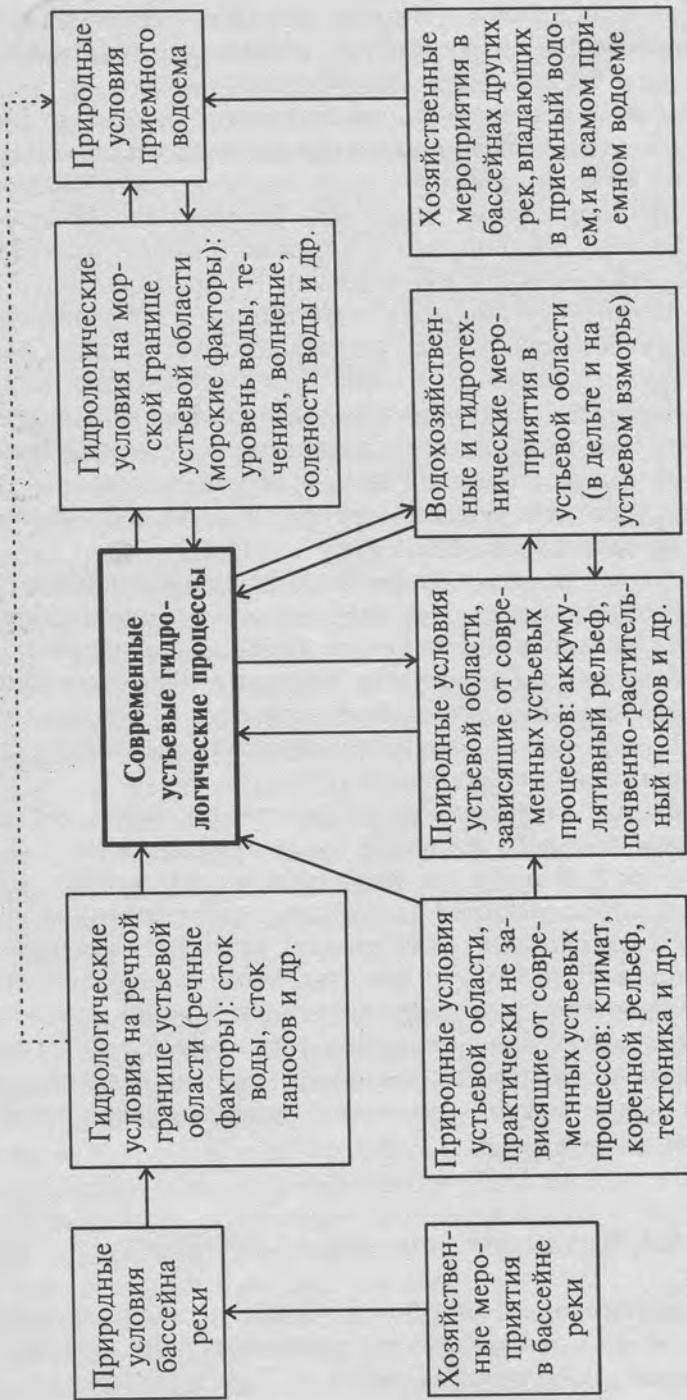


Рис. 1. Схема факторов устьевых процессов и их взаимодействия

Устья рек разными исследователями подразделялись на морские (океанические) и озерные; приливные и неприливные; простые и двойные (с лагунами); однорукавные и многорукавные (устья-дельты) и т. д.

В геоморфологической и географической литературе часто выделяют два типа устьевых областей (устьев) рек — дельты и эстуарии. Как будет показано ниже, такая классификация устьев рек не соответствует современному представлению об устьевых процессах и определению устьевой области реки (разд. 1.1). Поэтому, перед тем как предложить научно обоснованную типизацию устьев рек, необходимо рассмотреть подробнее смысл понятий «дельта» и «эстуарий».

Впервые термин «дельта» был применен древнегреческим историком, географом и путешественником Геродотом приблизительно в 450 г. до н. э. к устью Нила. Дельтой им была названа «аллювиальная суша более или менее треугольной формы, заключенная между расходящимися рукавами Нила и морем, напоминающая греческую букву Δ » [15, 26, 35]. Впоследствии понятие «дельта» было распространено на многие устья рек. В то же время выявились противоречия в понимании термина «дельта» представителями разных научных дисциплин. Геологический подход трактует дельту как толщу аллювиальных отложений в устье реки. Согласно геоморфологическому подходу, дельта — это аллювиальная равнина в устье реки. Гидрографический подход считает дельтой многорукавный участок реки в ее устье. Гидрографо-геоморфологический подход объединяет два предыдущих и рассматривает дельту как низменность в устье реки, сложенную речными наносами и расчлененную сетью рукавов и протоков (заметим, что близкий смысл в термин «дельта» вкладывал и Геродот).

Дельты разные исследователи делили на дельты выполнения (заполнения) заливов и дельты выдвигания (выдвинутые); последние — на дугообразные, клювовидные, блокированные; мало- и многорукавные.

Перед тем как сформулировать комплексное определение дельты, важно подчеркнуть следующее. 1. Дельта — природный комплекс, характеризующийся существенными особенностями рельефа, гидрографии, гидрологического режима, а также ландшафта и экологических условий. Поэтому определение дельты не может быть дано с узких позиций лишь какой-либо одной научной дисциплины. 2. Процесс аккумуляции речных (и час-

тично морских) наносов свойствен всем устьевым областям рек и ведет к формированию устьевого конуса выноса реки. Однако дельта возникает не всегда, а только на определенном этапе этого процесса, и поэтому процесс дельтообразования свойствен лишь определенным (дельтовым) устьевым областям. 3. Дельта — это лишь верхняя, в основном надводная часть устьевого конуса выноса. Поэтому в состав дельты нельзя включать ни сопредельную мелководную часть прибрежной зоны моря — устьевого взморья (иногда называемую «авандельтой»), ни всю толщу аллювиальных отложений, часто имеющих большой возраст и огромную мощность. 4. Дельта — это часть устьевого участка реки как специфического географического объекта. Точнее можно сказать, что дельта — это часть (и форма) устьевого участка реки. Поэтому дельта не может служить типом (формой) устьевого участка (устья) реки в целом, как нередко считают.

Дельта — это сформировавшаяся в результате современных процессов дельтообразования часть устьевого участка реки (устьевого участка реки), включающая верхнюю подверженную руслоформирующей деятельности речного потока толщу устьевого конуса выноса реки и надводную аллювиальную сушу, обычно имеющую сложную и изменчивую гидрографическую сеть и специфический «дельтовый» ландшафт.

Понятие «эстуарий» происходит от латинского слова «aestuariū», что означает затопляемое устье реки, лагуна, лиман, залив. Это латинское понятие в свою очередь происходит от «aestus» — кипение, волнение, прилив или «aestuo» — кипеть, бурлить. Термин «эстуарий», по-видимому, впервые стали применять римляне, видевшие бурное течение во время приливов в устьях рек Галлии и Британских островов [35].

Понятие «эстуарий» применяется в географии, по крайней мере, в четырех довольно различных значениях. Во-первых, как затопляемое, расширяющееся к морю устье реки (понятие «эстуарий» как любое воронкообразное устье реки впервые вошло в географическую литературу именно в таком смысле). Во-вторых, как воронкообразное устье, подверженное влиянию приливов. В-третьих, как полузакрытый, сообщающийся с морем прибрежный водоем, где речные воды смешиваются с морскими (сюда относится, например, широко распространенное определение эстуария, данное Д. Притчардом). В-четвертых, как любое устье реки (понимание, широко распространенное в американской и китайской литературе). В современной англоязычной на-

учной литературе к эстуариям относят совершенно разные объекты — затопленные речные долины, лагуны, фиорды, приливные реки и даже дельты, приливные проливы между лагунами и морем (tidal inlet), а также морские заливы некоторых типов (bay, gulf, sound).

Наиболее часто упоминаемые признаки эстуариев — это полузакрытый характер водоема в устье реки, смешение речных и морских вод, действие приливов. По нашему мнению, для упрощения толкования термина «эстуарий» из перечисленных признаков необходимо оставить лишь первый — полузакрытый характер устьевого взморья при обязательном наличии втекающей реки. Условие смешения речных и морских вод в этом случае выполняется автоматически. Приливы же не должны быть обязательным признаком эстуария в таком широком понимании этого понятия.

Кроме того, очевидно, что эстуарий — это не тип устьевой области, так как часть устья находится за пределами эстуария (как участок реки, особенно если он подвержен влиянию приливов, так и часть прилегающей зоны моря).

Таким образом, *эстуарий* — это полузакрытое устьевое взморье реки.

Устьевые области рек, впадающих в океаны, моря и крупные озера, весьма разнообразны и по строению, и по гидрологическому режиму. Это многообразие определяется, во-первых, морфологическими особенностями устьевого участка реки и устьевого взморья, а во-вторых, особенностями гидрологического режима устьевого участка реки (и самой реки) и устьевого взморья (и самого моря).

Поэтому типизация устьевых областей рек возможна лишь с использованием комплекса классификационных признаков, относящихся к строению и режиму обеих частей устьевой области реки — устьевому участку и устьевому взморью.

По морфологическим признакам все устьевые участки могут быть подразделены на бездельтовые и дельтовые, а устьевые взморья — на открытые и полузакрытые (эстуарные) (табл. 1; рис. 2). К последнему типу отнесены все полузакрытые устьевые взморья различных видов (при обязательном наличии впадающей реки): не очень широкие морские заливы; узкие морские заливы, не отгороженные блокирующими косами или пересыпями от моря (губы, риасы, фиорды); заливы, отгороженные от моря блокирующими косами или пересыпями (лиманы, лагуны); собственно воронкообразные приливные эстуарии (рис. 3).

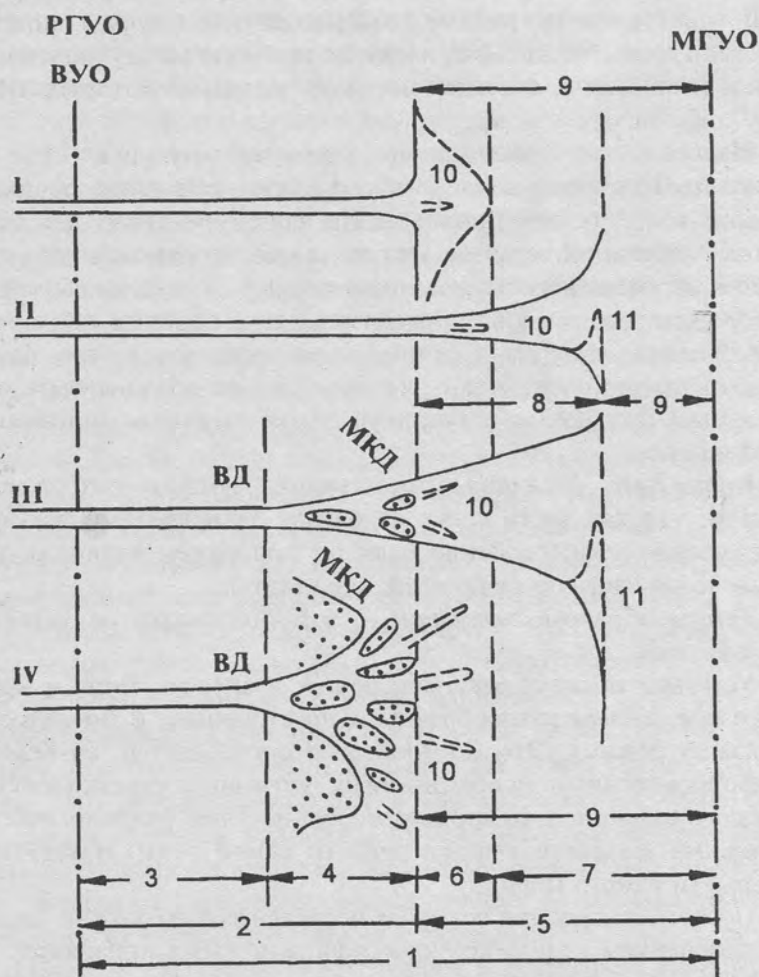


Рис. 2. Схемы устьевых областей рек разного типа и их районирования.

Устьевая область: I — простая, II — эстуарная, III — эстуарно-дельтовая, IV — дельтовая.

1 — устьевая область реки; 2 — устьевой участок реки; 3 — придельтовый участок реки; 4 — дельта; 5 — устьевое взморье, его части: 6 — отмеляя, 7 — приглубая, 8 — полузакрытая, 9 — открытая; 10 — подводные русла на устьевом взморье; 11 — блокирующие косы; РГУО (ВУО) — речная граница (вершина) устьевой области; МГУО — морская граница устьевой области; ВД — вершина дельты; МКД — морской край дельты

Классификация устьевых областей рек и их частей
по морфологическим признакам

Устьевой участок	Устьевое взморье	Устьевая область реки	Примеры устьевых областей рек
Однорукавный (бездельтовый)	Открытое: без блокирующей косы с блокирующей косой Полузакрытое: без блокирующей косы с блокирующей косой	I. Простая: Ia — без блокирующей косы Iб — с блокирующей косой II. Эстуарная: IIa — без блокирующей косы IIб — с блокирующей косой	Неблокированные и блокированные устья малых рек Ю. Буга, Мезени, Кулоя Эстуарные устья малых рек
Мало- и многорукавный (дельтовый)	Полузакрытое: без блокирующей косы с блокирующей косой Открытое	III. Эстуарно-дельтовая (с дельтой выполнения): IIIa — без блокирующей косы IIIб — с блокирующей косой IV. Дельтовая (с дельтой выдвигания)	Оби, Енисея Днестра, Днепра, Печоры Волги, Лены, Сулака, Куры

Дельты могут быть двух морфологических типов — дельты выполнения, формирующиеся на полузакрытых устьевых взморьях, и дельты выдвигания, формирующиеся на открытых устьевых взморьях.

Поэтому все устьевые области рек по своему строению подразделяются на четыре типа: I — простые, II — эстуарные, III — эстуарно-дельтовые, IV — дельтовые (см. табл. 1; рис. 2).

Предлагаемая морфологическая классификация устьевых областей рек отражает также и схему эволюции устьев рек. Возможны лишь два генетических ряда такой эволюции при относительно стабильном уровне приемного водоема: I → IV и II → III → IV (см. разд. 5.2).

В качестве дополнительных классификационных морфологических признаков должны быть использованы также: для дельтового устьевых участка реки — количество рукавов; степень изрезанности и выдвинутости морского края дельты (МКД); интенсивность выдвигания или отступления МКД, а для устьевых взморья — преобладающий характер глубин (табл. 2).

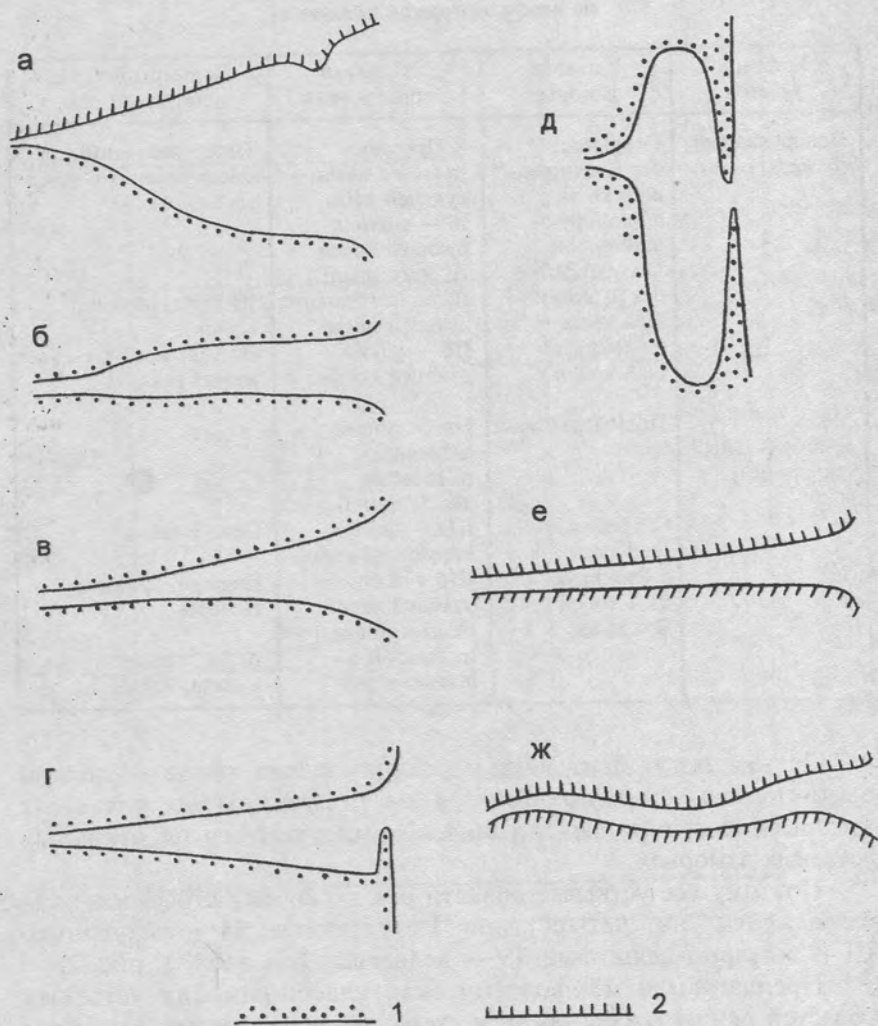


Рис. 3. Различные виды полузакрытого устьевоего взморья (эстуарного типа):
 а — морской залив, б — губа, в — приливный эстуарий, г — лиман, д — лагуна,
 е — фиорд, ж — риа. Берега: 1 — низменные аккумулятивные, 2 — гористые

**Дополнительные морфологические классификационные признаки
устьевых областей рек**

Признаки	Типы
Для дельтового устьевого участка реки	
Устьевой участок по количеству дельтовых рукавов (А)	A_1 — малорукавный (число рукавов < 5) A_2 — многорукавный (≥ 5)
Морской край дельты (МКД) по степени изрезанности и выдвинутости (Б)	B_1 — прямолинейный (параметр изрезанности МКД $K \approx 1$; параметр выдвинутости $N = 0-0,5$) B_2 — дугообразный, выровненный ($K = 1-1,4$; $N = 0,5-1$) B_3 — дугообразный, изрезанный ($K = 1,4-1,7$; $N = 1-2$) B_4 — лопастной, слабо расчлененный ($K = 1,7-2,4$; $N = 2-4$) B_5 — лопастной, сильно расчлененный ($K > 2,4$; $N > 4$)
Морской край дельты (МКД) по интенсивности выдвигения или отступления (В)	V_1 — сильно выдвигающийся (> 10 м/год) V_2 — слабо выдвигающийся (≤ 10 м/год) V_3 — стабильный V_4 — слабо отступающий (≤ 10 м/год) V_5 — сильно отступающий (> 10 м/год)
Для устьевого взморья	
Устьевое взморье по преобладающим глубинам (Г)	Γ_1 — очень приглубое (уклон дна взморья $> 1\text{‰}$) Γ_2 — умеренно приглубое ($1-0,1\text{‰}$) Γ_3 — умеренно отмелое ($0,1-0,01\text{‰}$) Γ_4 — очень отмелое ($< 0,01\text{‰}$)

Форма МКД может быть количественно описана с помощью двух показателей [25]: параметра изрезанности морского края дельты

$$K = L_{\text{МКД}} / L_{F_{\text{Д}}} = L_{\text{МКД}} / \sqrt{2\pi F_{\text{Д}}} \quad (1.1)$$

и параметра выдвинутости дельты в море

$$N = F_{\text{Д}} / F_{B_{\text{Д}}} = 8 F_{\text{Д}} / (\pi B_{\text{Д}}^2). \quad (1.2)$$

Здесь $L_{\text{МКД}}$ — длина морского края дельты; $L_{F_{\text{Д}}}$ — длина дуги полукруга, равновеликого части дельты, выдвинутой за гене-

ральную линию морского берега и имеющей площадь F_D ; F_{B_D} — площадь сопряженного с этой частью дельты полукруга, построенного на ширине дельты B_D , как на диаметре (рис. 4).

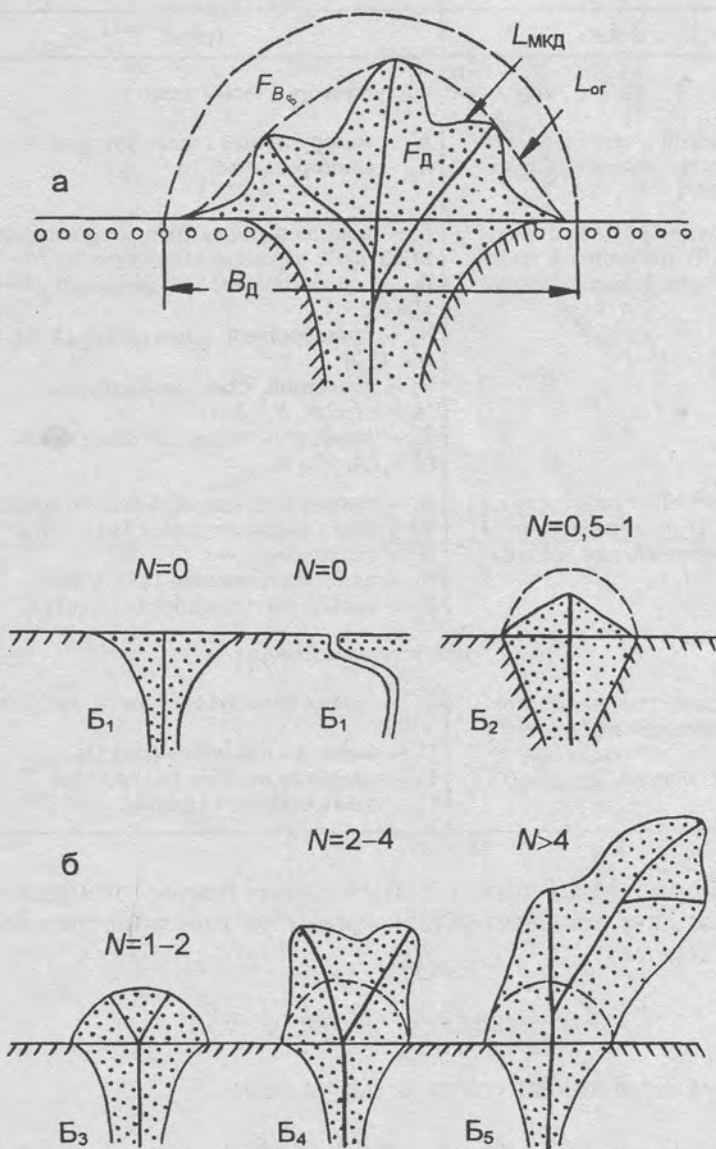


Рис. 4. Схема дельты выдвигания (а) и ее типы по степени выдвинутости морского края (б). Пояснения см. в тексте и в табл. 2. $L_{ор}$ — длина внешней огибающей контура дельты

Приглубым обычно считается такое взморье, когда речной поток, втекая в приемный водоем, отрывается от дна; отмелым — если такой поток занимает всю водную толщу. Поскольку у каждой устьевой области, особенно многорукавной, имеются районы и приглубого и отмелого взморья, тип конкретного устьевого взморья по характеру глубин предлагается устанавливать по преобладанию площади всего взморья, занятой либо приглубой, либо отмелой его частью. Кроме того, могут учитываться и абсолютная протяженность отмелой части взморья, и крутизна морского склона при приглубом взморье. В качестве некоторого формального признака степени приглубости устьевого взморья могут быть использованы уклоны дна, приведенные в табл. 2.

Из гидрологических классификационных признаков для устьевого участка реки могут использоваться три основных (табл. 3): характер водного режима и питания реки; средняя мутность воды (градации взяты по Г.И. Шамову); характер ледового режима. Из гидрологических классификационных признаков для устьевого взморья взяты (табл. 3): характер изменения фонового уровня моря; величина приливов; величина нагонов; преобладающие течения; волнение; соленость воды; характер ледового режима.

Таблица 3

Гидрологические классификационные признаки устьевых областей рек

Признак	Типы
Для устьевого участка реки	
Устьевой участок по характеру водного режима и питания (Д)	<p>D_1 — с длительным половодьем</p> <p>D_{1a} — дождевым, $D_{1б}$ — снеговым, $D_{1в}$ — ледниковым</p> <p>D_2 — с паводковым режимом (преобладают дождевые паводки)</p>
Мутность воды (средняя) (Е)	<p>E_1 — очень малая (≤ 50 г/м³)</p> <p>E_2 — малая (50–150 г/м³)</p> <p>E_3 — средняя (150–500 г/м³)</p> <p>E_4 — большая (500–1000 г/м³)</p> <p>E_5 — очень большая (1000–4000 г/м³)</p> <p>E_6 — чрезвычайно большая (> 4000 г/м³)</p>
Устьевой участок по характеру ледового режима (Ж)	<p>$Ж_1$ — незамерзающий</p> <p>$Ж_2$ — с неустойчивым ледяным покровом</p> <p>$Ж_3$ — замерзающий</p> <p>$Ж_{3a}$ — с заторами, $Ж_{3б}$ — без заторов</p>

Признак	Типы
Для устьевое взморья	
Относительный фоновый уровень моря с учетом тектонических движений и проседания дельтовых отложений (З)	Z_1 — быстро повышающийся (>2 см/год) Z_2 — медленно повышающийся (≤ 2 см/год) Z_3 — стабильный Z_4 — медленно понижающийся (≤ 2 см/год) Z_5 — быстро понижающийся (>2 см/год)
Устьевое взморье по величине сизигийных приливов (И)	I_1 — неприливное ($\leq 0,3$ м) I_2 — микроприливное (0,3–1,5 м) I_3 — мезоприливное (1,5–3 м) I_4 — макроприливное (≥ 3 м)
Нагоны (максимальные годовые) (К)	K_1 — слабые ($\leq 0,3$ м) K_2 — умеренные (0,3–1 м) K_3 — сильные (> 1 м)
Волнение на морской границе устьевое взморья (Л)	L_1 — слабое (высота волн 3% обеспеченности менее 0,25 м) L_2 — умеренное (0,25–0,75 м) L_3 — значительное (0,75–2,0 м) L_4 — сильное (2,0–6,0 м) L_5 — очень сильное ($> 6,0$ м)
Воды устьевое взморья (на ее морской границе) по величине солености (М)	M_1 — пресные (соленость воды менее 1‰) M_2 — солоноватые (1–25‰) M_3 — соленые (> 25 ‰)
Устьевое взморье по характеру ледового режима (Н)	H_1 — незамерзающее H_2 — с устойчивым припаем H_3 — полностью замерзающее

Любая устьевая область реки может быть типизирована лишь с привлечением комплекса гидролого-морфологических признаков с помощью соответствующих индексов (см. табл. 1–3). Из перечисленных признаков важнейшими должны быть признаны, во-первых, все морфологические (см. табл. 1–2), а, во-вторых, основные характеристики режима реки и приемного водоема (признаки Д, З, И, К, Л и М в табл. 3).

1.3. Районирование устьевых областей рек

Границы устьевой области реки выделяются по активному проявлению устьевых процессов (рис. 2 и 5). Речная (верхняя) граница устьевой области (РГУО) или ее вершина (ВУО) опре-

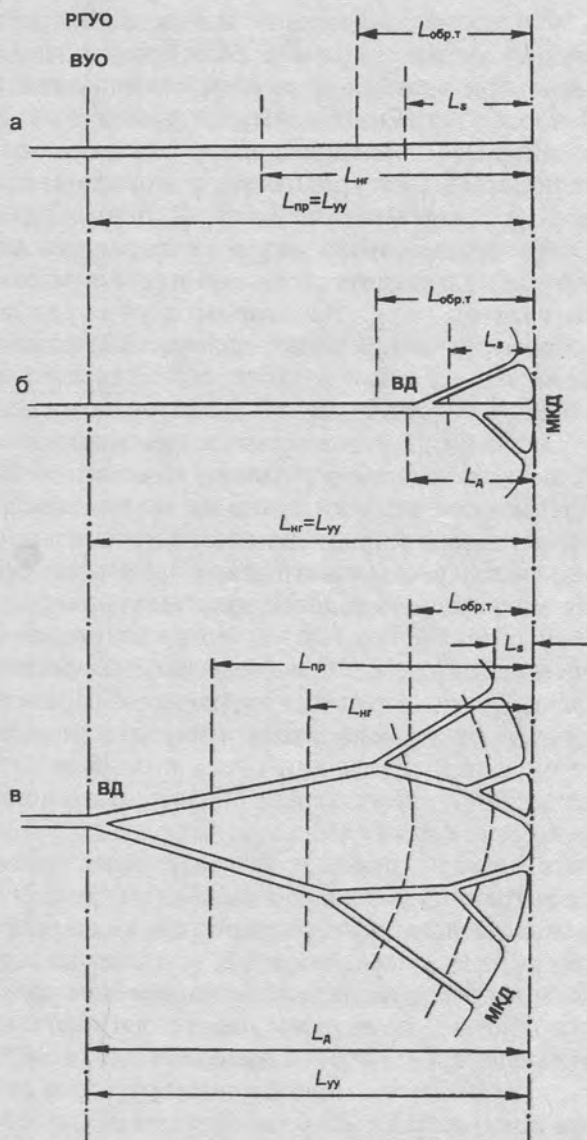


Рис. 5. Схема районирования устьев участка реки в случаях: однорукавного устья и преобладания приливов над нагонами (а), небольшой дельты и преобладания нагонов над приливами (б), крупной дельты и преобладания приливов над нагонами (в).

Длины участков: $L_{пр}$ — приливно-гононного, $L_{нр}$ — нагонного, $L_{обр.т}$ — с обратными течениями, L_s — с осолоненными водами (осолоненного), $L_{д}$ — дельтового, L_{yy} — устьевого; РГУО — речная граница устьевой области (устьевая граница реки); ВУО — вершина устьевой области; ВД — вершина дельты; МКД — морской край дельты

деляются либо по максимальной дальности распространения в реку колебаний уровня воды морского происхождения (приливов, нагонов) при меженном речном стоке (устья Дона, Сев. Двины, Печоры, Оби, Енисея, Амура) (рис. 2; 5, а, б), либо по месту, где начинается разветвление русла реки на дельтовые рукава, если колебания уровня воды морского происхождения сюда не доходят (устья Волги, Кубани, Терека, Лены) (рис. 5, в). В первом случае между речной границей устьевой области и вершиной дельты (если она имеется) находится придельтовый участок реки. Во втором случае речная граница устьевой области реки и вершина дельты (ВД) совпадают. Первый принцип определения верхней границы устьевой области реки обычно применим к устьям с небольшими дельтами или вообще без дельт, второй — к устьям с крупными дельтами.

Чтобы несколько сузить размеры устьевой области реки в случае выделения ее верхней границы по максимальной дальности распространения приливов или нагонов и придать критериям такого выделения большую определенность, следует ограничить рассматриваемые годовые максимальные величины нагонов 10%-й обеспеченностью, а соответствующие минимальные годовые меженные расходы воды 90%-й обеспеченностью. Участок реки, лежащий выше определенного таким образом устьевого участка и подверженный влиянию лишь очень редких (<10%) нагонов (приливов) при очень низкой межени (>90%), не следует включать в устьевую область. Его можно назвать приустьевым участком реки.

Морская (нижняя) граница устьевой области реки (МГУО) или внешняя граница устьевого взморья (см. рис. 2) выделяется по максимальной дальности распространения в море внешней (мористой) части фронтальной зоны при смешении речных и морских вод в поверхностном слое (подробнее см. гл. 3). Эту границу условно определяют по положению изогалины (линии одинаковой солености), равной приблизительно 90% солености воды сопредельной части моря при повышенном речном стоке (например, при расходах воды половодья 10%-й обеспеченности). В пресноводном водоеме эта граница может быть выделена по изобате, оконтуривающей рельеф зоны обмеления прибрежной полосы водоема, часто совпадающей с нижней частью свала глубин.

Часть акватории приемного водоема, лежащая за пределами определенных упомянутым способом границ устьевого взморья, но все же подверженная заметному опресняющему влиянию речного стока, называется предустьевым пространством моря.

Устьевой участок реки и устьевое взморье разделяются или морским краем дельты (МКД) — линией, оконтуривающей дельту и прилегающие к ней острова, или устьевым створом для случая бездельтового устьевого участка.

На устьевом участке выделяют, кроме того, приливный, нагонный участки, участки с обратными течениями и с осолоненными водами (см. рис. 5). Если приливы (нагоны) распространяются выше вершины дельты, то длина устьевого участка реки совпадает соответственно с длиной приливного (или нагонного) участка.

На устьевом взморье выделяют районы: пресноводный (транзита речных вод) с соленостью воды до 1‰ (иногда принимают до 2‰), фронтальный; стоковых, стоково-ветровых, стоково-приливных, ветровых, приливных течений.

Принцип выделения границ участков уже изложен выше: они определяются при минимальных годовых расходах воды 90%-й обеспеченности и сизигийных приливах или нагонах 10%-й обеспеченности. Принцип выделения границ районов на устьевом взморье — при максимальных годовых расходах воды 10%-й обеспеченности.

На устьевом взморье выделяют также отмелую и приглубую, полузакрытую и открытую части (см. рис. 2).

Длины участков в устьях некоторых рек приведены в приложении.

Как было сказано выше, длины участков и районов, если они выделяются по гидрологическим, а не по морфологическим признакам, определяют по максимальным или минимальным величинам характеристик этих признаков (расходы воды, нагоны). Таким образом, для конкретной устьевой области длины устьевого участка реки ($L_{\text{уу}}$), приливного ($L_{\text{пр}}$), нагонного ($L_{\text{нг}}$) участков, участков с обратными течениями ($L_{\text{обр.т}}$) и осолоненными водами ($L_{\text{с}}$), а также ширина районов на устьевом взморье (например, опресненных вод, стоковых течений) — величины постоянные (пока необратимо и радикально не изменится режим реки или моря) (см. рис. 5). В то же время в каждый конкретный момент времени дальности распространения прилива ($l_{\text{пр}}$), нагона ($l_{\text{нг}}$), обратных течений ($l_{\text{обр.т}}$), осолоненных вод ($l_{\text{с}}$), ширина пояса опресненных вод на взморье и т. д. разные и изменяются вслед за изменением стока реки в течение года, уровней воды во время прилива или нагона. Переменная (текущая) протяженность дальности распространения прилива (нагона), обратных течений и осолоненных вод, в отличие от постоянных участков, можно назвать зонами.

Для длин участков и зон для всех устьевых областей рек характерны следующие соотношения (см. рис. 2 и 5):

$$L_{\text{пр}} \text{ (или } L_{\text{нг}}) > L_{\text{обр.т}} > L_s, \quad (1.3)$$

$$l_{\text{пр}} \text{ (или } l_{\text{нг}}) > l_{\text{обр.т}} > l_s. \quad (1.4)$$

Соотношения вида (1.4) для случая прилива будут объяснены в разд. 2.4.

1.4. Гидрографическая сеть устья реки

Под *гидрографической сетью устьевой области и ее дельты* понимается вся совокупность естественных и искусственных, постоянных и временных водных объектов — водотоков и водоемов. Основные элементы гидрографической сети устьевой области показаны на рис. 6.

Гидрографическая сеть дельты в целом характеризуется следующими основными особенностями:

- 1) пространственной взаимосвязью отдельных водных объектов; дельта реки представляет собой единую гидрографическую систему, отдельные элементы которой гидравлически и морфологически взаимосвязаны;
- 2) большой временной изменчивостью как сети в целом, так и отдельных ее элементов; гидрографическая сеть дельты в целом обычно испытывает значительные стадийные и циклические изменения.

Водные объекты дельты подразделяются на *русловые водотоки* — водные объекты, характеризующиеся движением воды в направлении уклона по естественному или искусственному вытянутому углублению — руслу, и *водоемы* — скопления бессточных или с замедленным стоком водных масс в естественных или искусственных впадинах.

Совокупность дельтовых русловых водотоков образует *русловую сеть дельты*. Дельтовые водоемы часто составляют отдельные комплексы или *массивы дельтовых водоемов*.

Водотоки, которые являются результатом последовательно ветвления русла реки в пределах дельты и по которым осуществляется транзитный перенос вод и наносов реки в море или крупные дельтовые водоемы, можно назвать **транзитными**. Такие водотоки представляют собой главную часть русловой сети дельты и образуют единую, обычно сложную систему гидравлически взаимосвязанных водотоков.

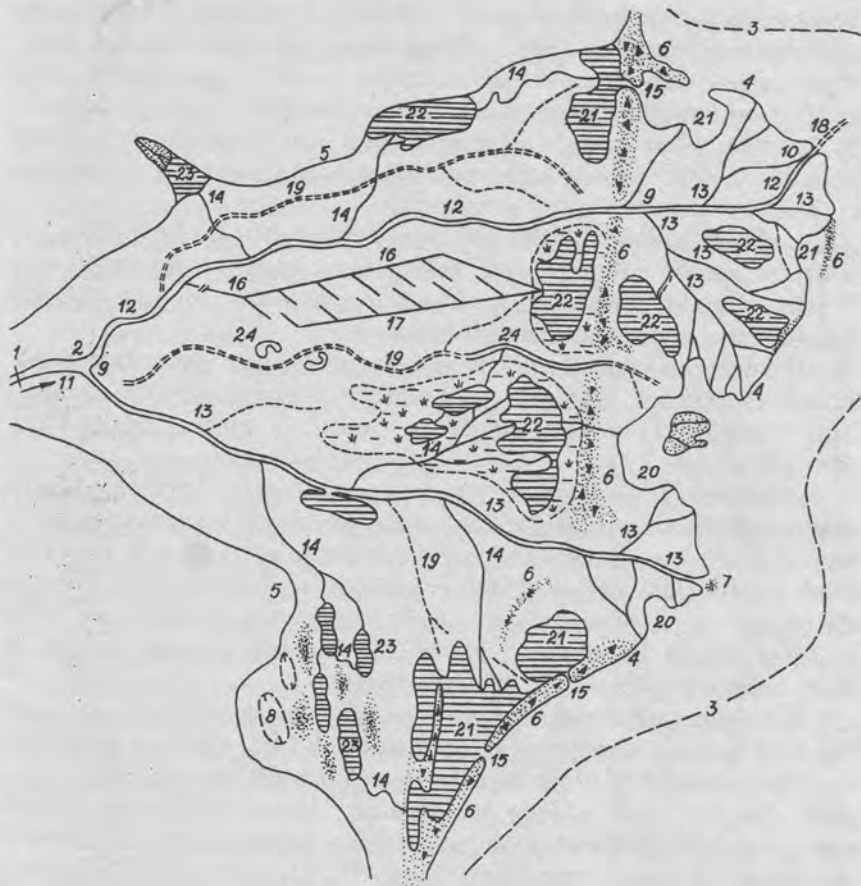


Рис. 6. Схема гидрографической сети устьевой области реки:

1 — вершина устьевой области (устьевое участку реки), 2 — вершина дельты, 3 — морская граница устьевой области (устьевое взморья), 4 — морской край дельты; морфологические элементы: 5 — склон долины, 6 — морская коса, в том числе древняя, 7 — устьевой бар, 8 — сухая котловина, 9 — узел разветвления водотоков, 10 — узел соединения водотоков; водотоки: 11 — основное русло реки, 12 — главный рукав дельты, 13 — рукав, 14 — проток; 15 — гирло, 16 — канал, 17 — коллектор, 18 — прорезь, 19 — русла отмерших водотоков; водоемы: 20 — устьевой залив, 21 — устьевая лагуна, 22 — дельтовое озеро, 23 — придельтовое озеро, 24 — старица

Наряду с такой системой водотоков почти во всех дельтах можно встретить водотоки, образование которых не связано с процессом ветвления русла самой реки. Роль таких водотоков обычно сводится к сравнительно ограниченному внутрительто-

вому перераспределению стока. Поэтому их называют **внутридельтовыми**. Наиболее распространены внутريدельтовые водотоки, дренирующие крупные массивы затопляемых земель и водоемов, водотоки, соединяющие системы озер. К их числу следует отнести и водотоки-промоины на островах устьевого взморья, а также промоины через береговой вал между приморскими водоемами дельты и взморьем.

Водотоки (обычно относительно крупные), которые, делясь, образуют собственную, в какой-то мере автономную сеть русловых водотоков, называют *магистральными*. Все другие водотоки относятся к категории *боковых*.

В качестве видовых названий естественных русловых водотоков в устьевой области реки достаточно применять следующие четыре: 1) основное русло реки; 2) рукав; 3) проток; 4) гирло.

Основное русло реки — русло, по которому осуществляется основной сток воды и наносов реки выше ее деления на дельтовые водотоки. Основное русло реки в общем случае не является элементом гидрографической сети дельты. Оно служит главным гидрографическим объектом устьевой области в тех случаях, когда ее вершина находится выше вершины дельты, и тем более в случае однорукавной дельты.

Наиболее крупные водотоки дельты, имеющие собственную русловую сеть, называются *рукавами*. Более мелкие водотоки дельты, обычно выполняющие функции соединительных водных артерий, называются *протоками*. Местные видовые названия нередко не соответствуют приведенным определениям. В некоторых устьях (например, Лены, Индигирки, Колымы) протоками неверно называют любые водотоки, в том числе крупные рукава. В таких случаях надо говорить, например, рукав Быковская протока в дельте Лены. В дельте Печоры как рукава, так и протоки называют «шары». В дельтах южных рек (Дуная, Волги, Кубани и др.) небольшие рукава и протоки, часто отмирающие, называют «ерики». Гирлами иногда (например, в дельте Дуная) называют дельтовые водотоки разного размера и происхождения (в том числе и крупные магистральные рукава). Однако термин «гирло» целесообразно применять только для коротких водотоков, соединяющих приморские водоемы дельты с устьевым взморьем.

Помимо чисто русловых водотоков в устьях рек встречаются водные объекты, которые лишь условно можно отнести к русловым. Это — подводная *стоковая бороздина*, выработанная стоковым течением на дне отмелого устьевого взморья и являющаяся обычно подводным продолжением дельтового руслового

водотока, и *проран* — короткий прорыв берега, соединяющий сблизившиеся при развитии боковой эрозии водотоки или водоток и водоем.

Для искусственных русловых водотоков достаточно использования трех основных видовых названий: *канал*, *коллектор*, *прорезь* (короткая искусственная выемка грунта для соединения различных водных объектов).

Русловая сеть дельты реки представляет собой сложную систему разветвляющихся и соединяющих водотоков, находящихся в различном соподчинении друг с другом.

Узлы разветвления и соединения водотоков служат связующими элементами между водотоками и потому являются относительно самостоятельными и важными элементами русловой сети дельты.

Узел разветвления водотоков может быть простым, когда *основной* (делимый) водоток разветвляется на два, или сложным, когда в результате возникает более двух новых водотоков.

Водотоки, образующиеся в результате разветвления основного водотока, назовем *смежными*. По степени симметрии можно выделить узлы симметричные, умеренно асимметричные и сильно асимметричные.

При симметричном разветвлении гидролого-морфологические характеристики смежных водотоков обычно равнозначны: образовавшиеся водотоки примерно равновелики, ни один из них не может быть признан продолжением основного (делимого) водотока.

При умеренно асимметричном разветвлении основные гидролого-морфологические характеристики всех водотоков, составляющих узел (включая и делимый), различны. В этом случае более крупный из образовавшихся водотоков и являющийся продолжением основного (делимого) водотока может быть назван *главным*, а остальные — *боковыми*.

Симметричное и умеренно асимметричное разветвление можно назвать *делением водотока*. Поскольку образующиеся в результате деления новые водотоки существенно отличаются от основного (делимого) водотока по размерам русла, стоку воды и наносов и по другим гидролого-морфологическим характеристикам, то новым водотокам следует придавать другие имена собственные, а в некоторых случаях — другие видовые названия.

При резко выраженной асимметрии разветвления большой (главный) водоток разветвления можно считать продолжением основного водотока. Его гидролого-морфологические характеристики незначительно или вовсе не отличаются от соответ-

ствующих характеристик основного водотока, поэтому за ним необходимо сохранить видовое название и имя собственное основного водотока. Характеристики же отделившегося небольшого бокового водотока (протока) несопоставимо малы по сравнению с соответствующими характеристиками не только основного, но и смежного главного водотока. В этом случае можно говорить уже не о делении водотока, а об *отделении водотока*, как о втором частном случае разветвления водотоков. Руслонаполняющий расход воды малого бокового водотока составляет менее 10% расхода основного.

По аналогии с узлами разветвления узлы соединения водотоков также могут быть подразделены по тем же гидролого-морфологическим признакам. Можно выделить два частных вида соединения. Первый вид — *слияние*, т. е. симметричное или умеренно асимметричное соединение водотоков, когда гидролого-морфологические характеристики основного водотока, образующегося в результате соединения, существенно отличаются от соответствующих характеристик сливающихся водотоков. При слиянии новому (основному) водотоку желательно давать соответствующее название, отличающееся от названий водотоков, его образовавших. При умеренно асимметричном слиянии больший из образующихся водотоков можно считать главным, меньший — боковым.

Второй вид соединения водотоков можно назвать *впадением*, когда относительно небольшой водоток (часто из другой системы) впадает в водоток значительно больших размеров. Это не вносит существенных изменений в гидролого-морфологические характеристики принимающего водотока. Поэтому название принимающего водотока ниже и выше узла соединения не изменяется.

Водоемы устьевой области — важнейшие элементы ее гидрографической сети, образование, развитие и состояние которых неразрывно связано с общим процессом развития устьевой области, и в первую очередь с процессом дельтообразования.

По местоположению в устьевой области можно выделить водоемы *дельтовые* и *придельтовые*.

Придельтовые водоемы (материковые и морские) генетически не являются морфологическими элементами аллювиальной дельтовой равнины, а только территориально примыкают к ней. Однако их гидрологический режим в значительной мере находится под влиянием устьевых процессов, и поэтому обычно они включаются в состав устьевой области.

К дельтовым водоемам относятся все водоемы, расположенные в пределах аллювиальной дельтовой равнины, в том числе

и те, которые имеют хорошую вязь с морем, но блокированы от него либо только конусами выносов водотоков, либо конусом выноса и морской аккумулятивной формой.

Среди дельтовых водоемов можно выделить *внутренние*, расположенные обычно в глубине дельты, а в режимном отношении больше тяготеющие к реке, и *приморские*, в режиме которых больше сказывается режим устьевого взморья.

По видовому названию в составе водоемов дельты можно выделить *дельтовое озеро* как естественный водоем с замедленным водообменом или вовсе глухой водоем в пределах дельтовой равнины и *устьевую лагуну* как бывшую часть устьевого взморья, блокированную морской косой или волноприбойным валом. Дельтовые озера и устьевые лагуны в дельте Кубани неверно называют лиманами.

К числу пойменных водоемов относятся *плавни* и *разливы*, а также *старицы* — заполненные водой участки русел отмерших водотоков. К числу приморских водоемов в приливных дельтах относятся соленые марши.

Гидрографическими элементами устьевого взморья могут быть *заливы* разного размера и происхождения: губы (в северных устьях), лиманы и куты (в южных устьях), бухты и др.

Глава 2. ДИНАМИКА ВОД В УСТЬЯХ РЕК

2.1. Основные особенности динамики вод в устьях рек

Особенности природных условий устьев рек и их гидрографии (гл. 1) определяют и особенности динамики вод в этих объектах. Эти особенности связаны прежде всего с влиянием приемного водоема и наличием дельты. Первая особенность предопределяет характер сопряжения уровенных поверхностей реки и моря; большое воздействие на динамику вод в устье реки колебаний уровня в прибрежной зоне приемного водоема, в частности приливных и сгонно-нагонных волн, которые даже могут вызвать обратные течения в речном русле; растекание речных вод на устьевом взморье; смешение речных и морских вод; большее, чем на других участках рек, воздействие ветра на водную поверхность; плотностные эффекты при взаимодействии пресных речных и соленых или солоноватых морских вод и т. д. Вторая особенность проявляется в распределении и перераспределении расходов воды по системе дельтовых водотоков; в сложном характере течений в узлах разветвления и соединения водотоков; затоплении поверхности дельты и т. д.

Перечисленные особенности существенно усложняют динамику вод в устьях рек, затрудняют применение уравнений гидродинамики, описывающих движение вод в устьях рек, усложняют методы расчета.

Для описания наиболее общих закономерностей гидрологических и гидравлических процессов в устьях рек широко используются одномерные математические модели. Примем следующие обозначения: x — пространственная координата (ось x направлена в сторону моря, если не оговорено обратное), t — время, Q — расход воды, v — средняя по сечению скорость течения, H — отметка уровня воды, ω — площадь поперечного сечения русла, B — ширина русла, h — средняя глубина потока, I — уклон водной поверхности, ρ — плотность воды (в общем

случае $Q, v, H, \omega, B, h, I, \rho$ переменны как вдоль русла, так и во времени), g — ускорение свободного падения.

Обобщение одномерных уравнений Сен-Венана на условия устьев рек приводит к двум основным уравнениям — неразрывности и движения. Первое из них для условий устьев рек можно записать в виде

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial \omega}{\partial t} = q, \quad (2.1)$$

где q — путевой (на единицу длины русла) приток или отток вод.

Уравнение движения для устьев рек обычно записывают в двух вариантах. В первом варианте в качестве основных переменных избираются уровень воды и средняя по сечению скорость течения, а уравнение движения записывается в составляющих уклона водной поверхности, т. е. в безразмерной форме:

$$-\frac{\partial H}{\partial x} = I = \frac{\alpha_1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\alpha_2 v}{g} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{v|v|}{C^2 h} + \frac{h}{2\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} - \frac{\tau_w}{\rho g h} + \frac{qv}{g\omega}. \quad (2.2)$$

Это уравнение есть результат обобщения обычного одномерного уравнения неустановившегося движения на условия устьев рек с дополнительным учетом переменного направления движения воды (для этого в член, учитывающий трение, вводится модуль скорости $|v|$), продольного градиента плотности $\partial \rho / \partial x$, воздействия ветра через его касательное напряжение τ_w , путевого притока q . Касательное напряжение ветра задается уравнением

$$\tau_w = f_w \rho_w W |W|, \quad (2.3)$$

где f_w — коэффициент трения ветра, W — вектор скорости ветра ($W |W| = W^2 \cos \varphi$, где φ — угол между осью потока и направлением ветра), ρ_w — плотность воздуха ($1,2928 \text{ кг/м}^3$); f_w часто принимают по Экману и Манку равным в среднем $2,6 \cdot 10^{-3}$. Плотность воды в условиях смешения речных и морских вод можно приближенно задать линейным уравнением состояния

$$\rho = \rho_0 + \beta_1 S + \beta_2 T, \quad (2.4)$$

где S — соленость воды в ‰, T — температура воды в °C, ρ_0 — стандартная плотность воды при $S = 0\text{‰}$, $T = 4^\circ\text{C}$, т. е. 1000 кг/м^3 , β_1 и β_2 — коэффициенты, учитывающие характер зависимости плотности воды от солености и температуры.

В простейшем случае принимают: $\beta_1 = 0,8 \text{ кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{‰})$, $\beta_2 = -0,07 \text{ кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{°C})$ при низкой ($\approx 5^\circ\text{C}$) и $\beta_2 = -0,4 \text{ кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{°C})$ при высокой ($\approx 30^\circ\text{C}$) температуре. Таким образом, $\partial\rho/\partial x$ в уравнении (2.2) равно

$$\frac{\partial\rho}{\partial x} = \beta_1 \frac{\partial S}{\partial x} + \beta_2 \frac{\partial T}{\partial x}. \quad (2.5)$$

Коэффициенты α_1 и α_2 (коррективны скорости) в уравнении (2.2) для речных потоков принимают обычно такими: $\alpha_1 \approx 1$, $\alpha_2 \approx 1,1$. Для устьев рек, особенно в сложных условиях режима и скоростной структуры, α_1 увеличивается до 1,5–2,0, а α_2 — до 3,0–3,5.

Коэффициент Шези C обычно принимают по Маннингу:

$$C = \frac{1}{h^{1/6} n}, \text{ где } n \text{ — коэффициент шероховатости.}$$

При втором варианте записи уравнения движения в качестве основных переменных избирают уровень и расход воды. Наиболее широко применяется модель, разработанная Сибирским отделением АН СССР, а уравнение движения записывается в виде

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{\omega} \right) = -g\omega \left(\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{Q|Q|}{K} \right) + R_W + P \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} \right), \quad (2.6)$$

где K — модуль расхода, равный, согласно формуле Шези, $CBh^{\frac{3}{2}}$, P — сила гидростатического давления, R_W — член, учитывающий ветровое и барометрическое воздействие:

$$R_W = f_W BW_x |W| - \frac{\omega}{\rho} \frac{\partial p_a}{\partial x}. \quad (2.7)$$

Здесь W_x — проекция скорости ветра на ось x , p_a — атмосферное давление.

2.2. Типы течений в устьях рек

Движение воды в устьях рек, как и в других водных объектах, обычно подразделяют на два типа — неустановившееся ($\partial v/\partial t \neq 0$) и установившееся (стационарное) ($\partial v/\partial t = 0$). Движение последнего типа в свою очередь делят на два подтипа — неравномерное ($\partial v/\partial x \neq 0$) и равномерное ($\partial v/\partial x = 0$).

Для упрощения задачи ограничимся лишь анализом упрощенного уравнения установившегося движения при $q = 0$. В этом случае уравнение (2.2) превращается в следующее:

$$I = \frac{\alpha_2 v}{g} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{v|v|}{C^2 h} - \frac{3,36 \cdot 10^{-6} W^2 \cos \varphi}{gh} + \frac{h}{2\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x}. \quad (2.8)$$

Это уравнение позволяет оценить влияние изменения скорости течения и плотности воды вдоль потока, трения на дне и воздействия ветра на уклон водной поверхности, а следовательно и на уровни воды.

При преобладании в потоке сил трения для скорости течения можно получить

$$v = \pm C \sqrt{h \left| I - \frac{\alpha_2 v}{g} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{3,36 \cdot 10^{-6} W^2 \cos \varphi}{gh} - \frac{h}{2\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} \right|}. \quad (2.9)$$

Это уравнение позволяет оценить влияние на скорость течения в устье реки донного трения, ветра, продольных градиентов скорости течения и плотности воды. Чтобы представить скорость течения в виде явной функции определяющих факторов, необходимо проинтегрировать уравнение (2.9) от $x = 0$ до $x = x$ и от $v = v_0$ до $v = v$. Искомый интеграл будет равен

$$v^2 = (v_0^2 - C^2 h A) \exp\left(-\frac{2gx}{\alpha_2 C^2 h}\right) + C^2 h A, \quad (2.10)$$

где

$$A = I + \frac{3,36 \cdot 10^{-6} W^2 \cos \varphi}{gh} - \frac{h}{2\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x}. \quad (2.11)$$

Уравнение (2.10) характеризует изменение средней скорости течения вдоль потока.

При исключении из этого уравнения члена, учитывающего воздействие ветра, получим уравнение движения, пригодное для описания динамики вод на отмеле устьевом взморье при отсутствии действия ветра, но при сохранении уклона водной поверхности и продольных градиентов плотности (случай *инерционно-гравитационно-плотностного течения*). При исключении из уравнения (2.10), кроме того, и плотностного члена получим уравнение для *инерционно-гравитационного течения*. Наконец, при исключении из уравнения (2.10) также и уклона водной поверхности I , получим уравнение, характеризующее закон га-

шения скорости речного течения на приглубом устьевом взморье (*чисто инерционное течение*):

$$v = v_0 \exp\left(-\frac{gx}{\alpha_2 C^2 h}\right). \quad (2.12)$$

Если на приглубом устьевом взморье $I = 0$, но имеется продольный градиент плотности (случай *инерционно-плотностного течения*), то из уравнения (2.10) с учетом (2.11) получим

$$v^2 = \left(v_0^2 + \frac{C^2 h^2}{2\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x}\right) \exp\left(-\frac{2gx}{\alpha_2 C^2 h}\right) - \frac{C^2 h^2}{2\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x}. \quad (2.13)$$

Уравнения квазиравномерного движения могут быть получены из выражений (2.8) и (2.9). Уравнения для *гравитационно-ветрового течения*, выраженные относительно I и v , будут следующие:

$$I = \frac{v|v|}{C^2 h} - \frac{3,36 \cdot 10^{-6} W^2 \cos \varphi}{gh}, \quad (2.14)$$

$$v = \pm C \sqrt{h \left| I + \frac{3,36 \cdot 10^{-6} W^2 \cos \varphi}{gh} \right|}. \quad (2.15)$$

Уравнения для *гравитационно-плотностного течения* будут

$$I = \frac{v|v|}{C^2 h} + \frac{h}{2\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x}, \quad (2.16)$$

$$v = \pm C \sqrt{h \left| I - \frac{h}{2\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} \right|}. \quad (2.17)$$

Знаки в уравнениях (2.15) и (2.17) совпадают со знаком выражения, стоящего под модулем.

Уравнения (2.14) и (2.15) позволяют оценивать изменение уклонов (уровней) воды и скорости течения в устьевых водотоках под воздействием речного стока и ветра. Попутный ветер ($\cos \varphi > 0$) уменьшает уклон водной поверхности и увеличивает скорость течения. Встречный ветер ($\cos \varphi < 0$), наоборот, увеличивает I и уменьшает v . При сильном встречном ветре выражение под модулем в уравнении (2.15) может приобрести отрица-

тельный знак; это будет означать, что возникает обратное течение ($v < 0$). Уравнения (2.16) и (2.17) позволяют оценивать уклоны (уровни) воды и скорости течения в устьях рек при наличии продольных градиентов плотности воды. Градиенты плотности увеличивают уклоны водной поверхности. При достаточно больших величинах $\partial\rho/\partial x$ выражение под модулем в уравнении (2.17) может приобрести отрицательный знак; это будет означать возникновение обратных течений ($v < 0$).

При отсутствии ветра и продольных градиентов плотности из уравнений (2.14)—(2.17) получим

$$I = \frac{v|v|}{C^2h}, \quad (2.18)$$

$$v = \pm C \sqrt{h|I|}. \quad (2.19)$$

Последние два уравнения характеризуют основной вид течений в водотоках дельты — *чисто гравитационных*. Эти уравнения (аналоги формулы Шези) широко используются для расчета как прямых потоков в дельтах, обусловленных речным стоком, так и обратных, обусловленных приливами или нагонами.

Уравнения (2.18)—(2.19) часто удобнее выразить через падение уровня $-\Delta H = Il$, где l — длина участка потока, расход воды Q и модуль сопротивления F , равный $l/C^2B^2h^3$ или

$$\ln^2 / \left(B^2 h^{\frac{10}{3}} \right):$$

$$-\Delta H = FQ|Q|. \quad (2.20)$$

$$Q = \pm \sqrt{\frac{|\Delta H|}{F}}. \quad (2.21)$$

Если оказывается возможным пренебречь уклонами водной поверхности ($I=0$), то из уравнения (2.15) получим уравнение для *чисто ветрового течения*

$$v = C \sqrt{\frac{3,36 \cdot 10^{-6} W^2}{g}} = 1,88 \cdot 10^{-3} \frac{CW}{\sqrt{g}}. \quad (2.22)$$

Течение этого вида встречается на устьевом взморье. Обычно принимают, что направление ветровых течений на устьевом

взморье вдали от берега совпадает с направлением ветра (на ограниченных мелководных акваториях влиянием силы Кориолиса пренебрегают), и поэтому полагают $\cos \varphi = 1$. Выражение, стоящее перед W в формуле (2.22), — это, по существу, так называемый ветровой коэффициент. Как видно из уравнения (2.22), этот коэффициент растет с увеличением коэффициента Шези от 0,017 при $C = 30$ до 0,046 при $C = 80$. Эти цифры весьма правдоподобны (обычно считают, что ветровой коэффициент на устьевом взморье составляет 0,02—0,04).

Если создаются условия, позволяющие пренебречь влиянием уклона водной поверхности и ветра, то течения в устье реки будут обусловлены только продольными градиентами плотности. Уравнение *чисто плотностного течения* получит вид

$$v = \mp Ch \sqrt{\frac{1}{2\rho} \left| \frac{\partial \rho}{\partial x} \right|}. \quad (2.23)$$

Знак скорости здесь обратен знаку выражения, стоящего под модулем.

В устьях рек плотностные течения, как правило, направлены поперек изопикн в сторону уменьшения плотности (от моря в реку), т. е. совсем не так, как в открытом океане, где плотностные течения под влиянием силы Кориолиса совпадают с направлением изопикн.

2.3. Вертикальная неоднородность потока в устьях рек

Наибольшую сложность при исследовании устьев рек представляет неоднородность потока по длине, ширине и особенно по глубине русла. Наиболее важна вертикальная и продольная неоднородность плотности воды, обусловленная взаимодействием речных и морских вод с различной соленостью, температурой и мутностью.

Исходя из соотношения плотностей речных вод и вод приемного водоема (моря, озера), Ч. Бейтс выделил три типа втекания речного потока в приемный водоем: гипопикнальное — плотность речной воды меньше плотности воды в водоеме, гиперпикнальное — плотность воды реки больше плотности воды в водоеме, гомопикнальное — плотности равны. Первый случай наиболее типичен для втекания рек в водоемы с солоноватой или соленой водой: речная струя распространяется над более плотной морской водой. Второй случай наблюдается, когда бо-

лее холодная речная вода втекает в пресный водоем с более теплой водой, например осенью при впадении Селенги в Байкал, Роны в Женевское озеро, Рейна в озеро Констанца, либо когда в водоем впадает речная вода с очень большим содержанием мелких наносов, как в устье р. Хуанхэ. В этих случаях речной поток «ныряет» под воду водоема и втекает в него в виде «плотностного» течения. Третий случай занимает промежуточное положение. Существует и еще один, четвертый, тип взаимодействия речных и морских вод, пока, к сожалению, еще мало изученный. Контакт речных и морских вод происходит в данном случае без их взаимопроникновения (речных вод на акваторию взморья, а морских вод на устьевой участок реки), через зону максимальной плотности воды, возникающей вследствие интенсивного испарения. Возникает своеобразная двухслойная циркуляция вод на устьевом участке реки: речные воды натекают на высокосоленные воды с верхней (речной) стороны зоны повышенной солености воды, а морские воды натекают на высокосоленные воды с нижней (морской) стороны зоны повышенной солености воды. Зона максимальной солености служит для речных и морских вод природной границей раздела. Такое явление получило название «обратного» эстуария и характерно для устьевых областей рек Австралии и Африки. Ярко выраженным оно бывает в сухой сезон года или в период засух (см. разд. 3.2).

В морских устьях рек наиболее распространен случай гипопикнального втекания. Если между пресной речной и соленой морской водой создаются достаточно большие вертикальные и горизонтальные градиенты плотности, возникает специфическая двухслойная плотностная циркуляция, называемая эстуарной. Ее механизм может быть объяснен следующим образом.

Движущими силами в любом потоке (без учета тангенциального напряжения ветра) являются продольные градиенты давления, которые определяются продольными уклонами водной поверхности и продольными градиентами плотности воды. Влияние уклона водной поверхности неизменно на всех глубинах и при установившихся условиях режима направлено всегда в сторону моря, а воздействие продольных градиентов плотности возрастает приблизительно линейно с глубиной и направлено от моря в сторону реки (рис. 7). Суммарный градиент давления, обусловленный этими двумя воздействиями, есть результат алгебраического сложения двух составляющих. Течение воды на разных глубинах в основном определяется величиной и направлением градиента давления, а также трением у дна и на границе раздела разнонаправленных потоков.

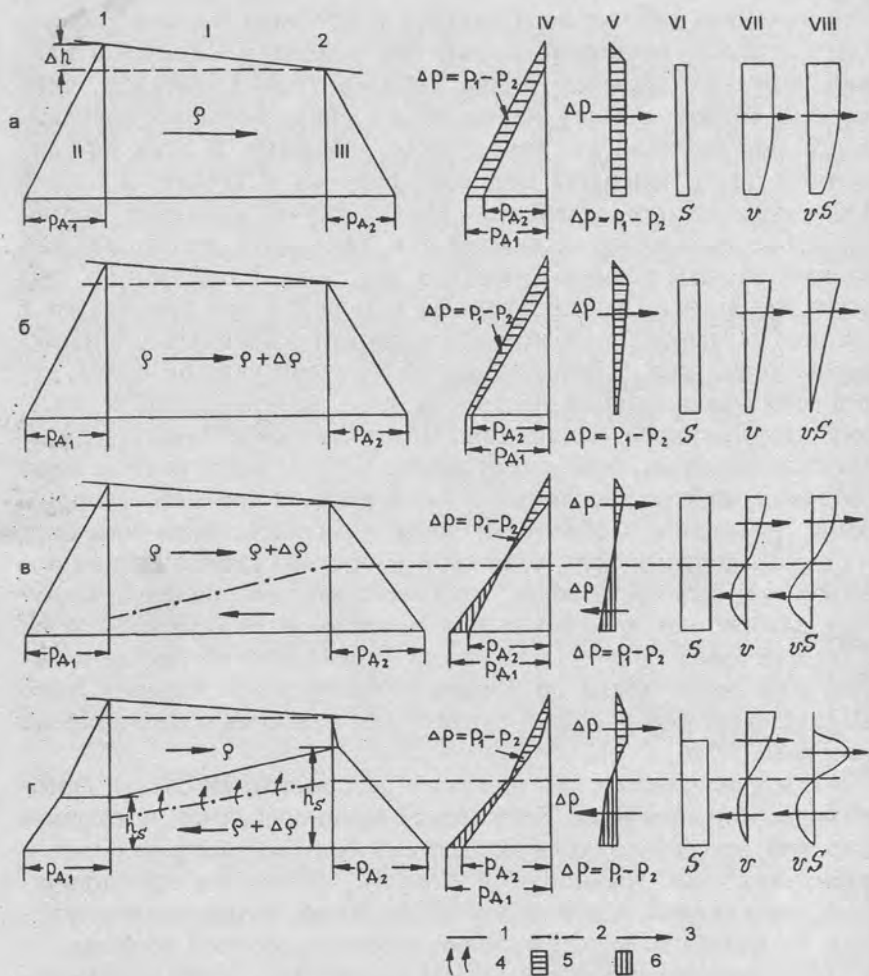


Рис. 7. Схема распределения давления и формирования плотностной циркуляции в устье потока:

а — поток однородный по вертикали и в продольном направлении; б — поток однородный по вертикали с умеренными продольными градиентами плотности; в — поток однородный по вертикали с большими продольными градиентами плотности; г — поток стратифицированный. I — продольный разрез; II — распределение давления в верхнем сечении (1); III — то же в нижнем сечении (2); IV — сравнение распределения давления в этих сечениях (p_1 и p_2); V — распределение по глубине продольного градиента давления ($\Delta p = p_1 - p_2$); распределение по глубине в нижнем сечении: VI — солёности воды, VII — скорости течения; VIII — переноса солей. 1 — граница раздела вод с различной плотностью; 2 — линия нулевой скорости течения; 3 — направление течения, переноса солей и градиента давления; 4 — вовлечение в движение воды из нижнего слоя; градиент давления направлен в сторону: 5 — моря, 6 — реки

В однородном потоке или в потоке с небольшими продольными градиентами плотности при наличии положительного уклона водной поверхности (рис. 7, а, б) суммарный градиент давления направлен в сторону моря на всех глубинах. При больших продольных градиентах плотности (рис. 7, в) или большой вертикальной плотностной неоднородности (рис. 7, г) в верхней части потока продольный градиент давления в основном обусловлен положительным уклоном водной поверхности и направлен в сторону моря, в нижней же части потока продольный градиент давления определяется продольными градиентами плотности и направлен в сторону реки.

Таким образом, как видно из рис. 7, если в однородном по глубине потоке неизменным условием эстуарной циркуляции являются значительные продольные градиенты плотности, то в стратифицированном потоке наличие продольных градиентов плотности — условие не обязательное, необходима лишь наклоненная в сторону моря граница раздела вод с различной плотностью.

Рис. 7 иллюстрирует мгновенные схемы распределения давления, солености и течений в идеализированном потоке при наличии уклона водной поверхности в сторону моря, что характерно не только для неприливых устьев рек, но и для приливных устьев рек при средних приливных условиях и в фазу отлива. В зависимости от приливной фазы картина может измениться: зона взаимодействия речных и морских вод будет смещаться вдоль русла; при приливном подъеме уровня усиливаются течения, направленные в сторону реки, вплоть до поворота течений на обратные на всех глубинах. В этих случаях влияние обратного продольного уклона водной поверхности и продольных градиентов плотности складывается.

2.4. Сопряжение речного потока и приемного водоема при отсутствии приливов и нагонов

Продольное распределение в потоке на устьевом участке реки уровней воды (глубин) и скоростей течения зависит от сочетания расходов воды реки Q_p и высоты стояния уровня приемного водоема H_m . В любом пункте устьевом участка реки уровень воды связан с Q_p и H_m зависимостью вида

$$H_i = f(Q_p, H_m). \quad (2.24)$$

На однорукавном устьевом участке реки при расходах воды меньше некоторого Q_* кривые свободной поверхности представлены вогнутыми линиями (кривыми подпора), больше этого расхода — выпуклыми линиями (кривыми спада). Расход Q_* обычно заметно больше среднего многолетнего. В связи с тем, что русло на устьевом участке реки обычно сформировано довольно большими расходами воды, поток не только в межень, но и при расходах воды несколько выше средних оказывается в подпоре со стороны моря. Повышение фонового уровня моря влечет за собой увеличение того расхода Q_* , при котором на устьевом участке реки наблюдается квазиравномерный режим и кривые подпора переходят в кривые спада.

Аналогичные особенности свойственны и сопряжению реки и моря в дельтах (рис. 8). Наиболее характерные черты продольных профилей водной поверхности и колебаний уровня воды в дельтах рек следующие: а) уменьшение величин (размаха) колебаний уровня в течение года (от половодья к межени и наоборот) по направлению к приемному водоему; б) изменение продольных профилей водной поверхности с вогнутых на выпуклые при довольно больших расходах воды реки; при этом на участке реки вдали от приемного водоема и выше вершины дельты уровень воды от межени к половодью поднимается приблизительно параллельно самому себе; в) резкое увеличение уклонов водной поверхности в пределах дельты при увеличении расходов воды. Особенно значительно возрастают уклоны в нижней части дельты. Последнее связано не только с прекращением состояния подпора со стороны приемного водоема при возрастании расходов воды выше некоторых значений, но и со специфическими особенностями многорукавных русловых систем, обладающих повышенными гидравлическими сопротивлениями и поэтому имеющих повышенные уклоны водной поверхности (см. гл. 5). Во многих крупных дельтах увеличение уклонов водной поверхности в нижней части дельты отмечается даже в межень.

В пределах устьевого участка реки отметки дна русла обычно наименьшие. В межень при снижении уровня воды в реке создается впечатление переуглубления дна реки как по отношению к уровню приемного водоема или отметкам дна устьевого бара (а иногда и прилегающей части устьевого взморья), так и по отношению к вышележащим участкам реки, где глубины оказываются меньше. Первый вид переуглубления назовем абсолютным, второй — относительным.

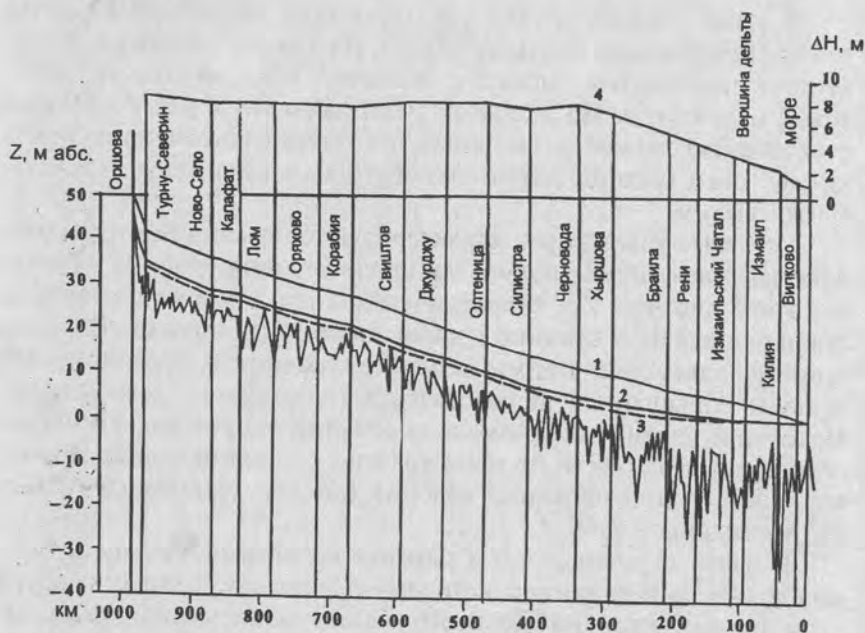


Рис. 8. Изменение вдоль нижнего течения и дельты Дуная отметок дна и водной поверхности в среднее половодье (1), среднюю (2) и самую низкую (3) межень; величины сезонных колебаний уровня в 1965 г. (4)

Абсолютное переуглубление объясняется тем, что любой поток формирует себе ложе с большей или меньшей глубиной, зависящей от руслоформирующего расхода воды (см. гл. 5). Поскольку отметку уровня воды в устьевом створе приблизительно можно считать равной отметке уровня приемного водоема, дно устьевое участка реки вблизи устьевое створа всегда оказывается ниже уровня приемного водоема (моря, озера), в который впадает река.

Относительное переуглубление на устьевом участке реки в большинстве случаев является следствием значительно меньшего снижения уровня воды от половодья к межени вблизи приемного водоема по сравнению с вышележащими участками вследствие стабилизирующего влияния приемного водоема на уровни воды. В половодье же глубины вдоль однорукавного устьевое участка выравниваются и явление относительного переуглубления обычно исчезает.

Однако нередки случаи формирования на устьевом участке реки действительно больших глубин (больших, чем выше по течению), что обычно связано с особенностями литологии дельтовых отложений. На устьевых участках многих рек в условиях легкой размываемости песчаных отложений встречаются участки местного (иногда значительного) размыва, именуемые устьевыми ямами.

Устьевые участки рек характеризуются весьма быстрым распластыванием волны половодья вдоль течения (рис. 9). Причины этого явления как гидравлические, так и морфологические: стабилизирующее влияние уровня приемного водоема, большая ширина дельтовой поймы и многорукавность русловой сети дельты, повышенная шероховатость поверхности дельты и др. Некоторое увеличение размаха колебаний уровня воды в непосредственной близости от моря связано с влиянием либо приливов, либо сгонно-нагонных явлений (рис. 9). Некоторые примеры приведены в табл. 4.

В связи с уменьшением размаха колебаний уровня в течение года с приближением к приемному водоему (морю, озеру) в этом направлении на устьевом участке реки уменьшается наклон кривых $Q=f(H)$ (рис. 10, а). Вблизи приемного водоема кривые расходов (при отсутствии приливов и нагонов) становятся почти горизонтальными. Ветвь спада в дельтах рек расположена обычно выше кривой подъема. Различие в уровнях воды на подъеме и спаде обычно уменьшается с приближением к приемному водоему. На различиях уровней на подъеме и спаде сказывается и сезонный ход уровня приемного водоема, поскольку обычно отмечается запаздывание колебаний уровня в водоеме по сравнению с колебаниями уровней (и расходов) во впадающей в него крупной реке.

Таблица 4

Изменение средней высоты половодья (м)
вдоль низовьев и устьевых участков некоторых рек

Река	Расстояние от моря, км										
	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
Волга	2,4*	2,0	2,4	3,2	3,6	4,4	4,9	5,5	6,0	6,4	7,0
Дунай	1,8*	1,5	2,2	2,9	3,5	4,2	4,6	5,2	5,5	5,9	6,2
Меконг	2,6**	1,8	2,2	2,6	2,8	3,0	3,3	3,6	3,9	4,4	—
Красная	2,2**	1,6	3,4	4,2	4,9	5,6	6,3	6,6	7,1	7,7	—

Примечание: * Влияние нагонов, ** влияние приливов.

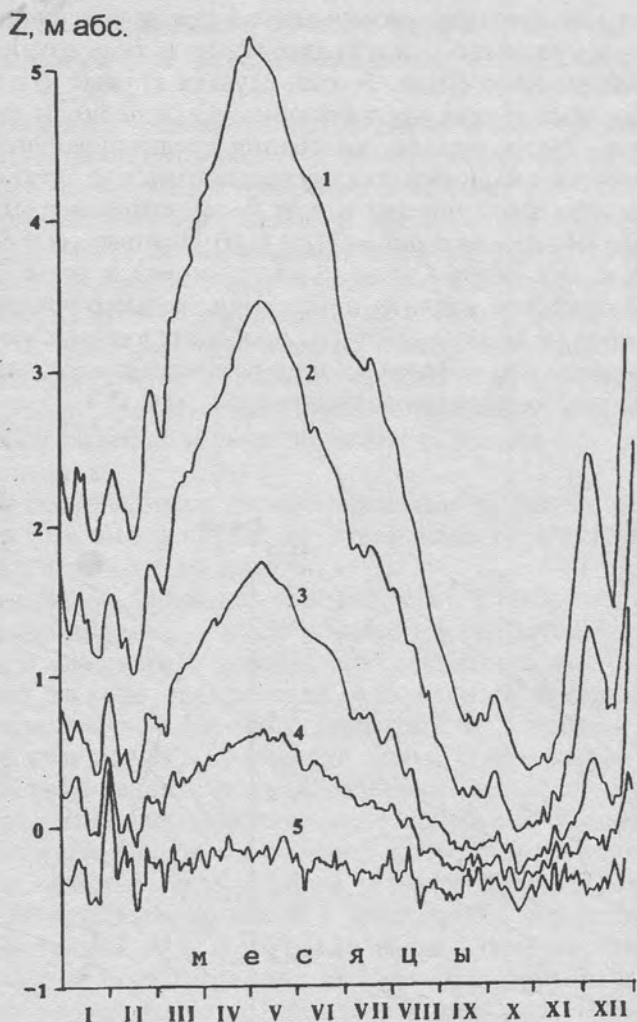


Рис. 9. Типичные графики колебаний уровня воды в течение года на устьевом участке крупной реки (Дунай, 1958 г.):

1 — Рени (164 км от Черного моря), 2 — Измаил (94 км), 3 — Килия (47 км), 4 — Вилково (18 км), 5 — Приморское (устьевое взморье)

В случае формирования на однорукавном устьевом участке реки гидравлического спада, например в значительное половодье, скорости течения вдоль русла увеличиваются ($dv/dx > 0$); в случае формирования гидравлического подпора (в межень) — уменьшаются ($dv/dx < 0$).

Повышение среднего уровня моря ведет к усилению явлений подпора, снижение — к их ослаблению и даже возникновению гидравлического спада. В этих случаях кривые $Q=f(H)$ в периоды подъема уровня моря повышаются, в периоды падения понижаются. Часто, однако, колебания среднего уровня моря сопровождаются сильными аккумулятивными или эрозионными процессами, что приводит к еще более существенным вертикальным смещениям кривых $Q=f(H)$. Кривые $Q=f(H)$ за 1934—1976 гг. на посту Сулак (6 км от моря) в устье Сулака (рис. 10, б) отражают влияние понижения среднего уровня Каспийского моря, а за 1980—1986 гг., наоборот, влияние повышения уровня моря. Об эрозионно-аккумулятивных процессах при колебаниях уровня приемного водоема см. разд. 5.4.

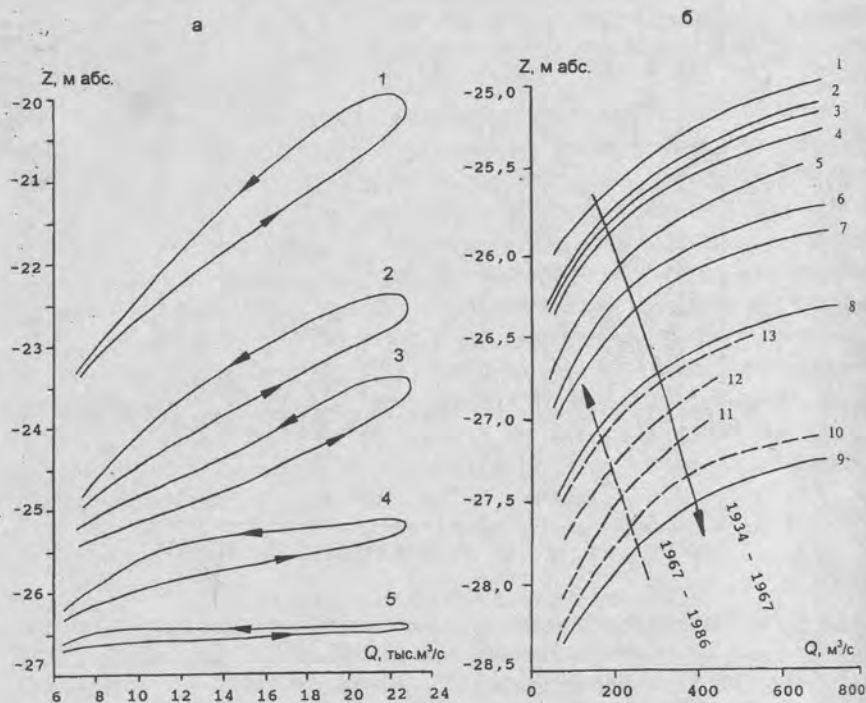


Рис. 10. Кривые расходов в неприливых устьях рек:

а — устье Волги (1994 г.): 1 — Верхнее Лебяжье (вершина дельты, 0 км), 2 — Астрахань (53 км), 3 — Икряное (91 км), 4 — Оля (140 км), 5 — о. Искусственный (отмеляя зона устьевой взморья, 191 км); расход воды Волги взят в вершине дельты (Верхнее Лебяжье); б — устье Сулака: 1 — 1934, 2 — 1935, 3 — 1939, 4 — 1937, 5 — 1938, 6 — 1939, 7 — 1940, 8 — 1954, 9 — 1967, 10 — 1980, 11 — 1982, 12 — 1984, 13 — 1986 гг.

2.5. Сопряжение речного потока и приемного водоема при неустановившемся движении воды

Воздействие паводков, приливов и сгонно-нагонных явлений существенно усложняет и без того сложные закономерности сопряжения реки и приемного водоема.

Длинные волны в устьях рек при неустановившемся движении воды могут быть классифицированы следующим образом: 1) прямые положительные волны (подъем половодья, паводка, попуска); 2) прямые отрицательные волны (спад половодья, паводка, попуска); 3) обратные положительные волны (приливный подъем уровня, повышение уровня при нагоне, восстановление уровня после сгона); 4) обратные отрицательные волны (отливное падение уровня, понижение уровня при сгоне и после нагона).

Наибольшее влияние на сопряжение речного потока и приемного водоема в случае неустановившегося движения воды оказывают приливы и нагоны.

Одиночные волны паводка (попуска), а также нагонные волны распространяются вдоль речного потока как бы *по* предшествующей явлению невозмущенной уровенной поверхности, зависящей от величины расхода воды реки Q_p вне влияния приемного водоема и фонового (осредненного) уровня воды приемного водоема H_m . Одиночная волна сгона распространяется как бы *под* предшествующей явлению невозмущенной уровенной поверхностью. Приливные же колебания уровня происходят *относительно* (выше и ниже) той уровенной поверхности, которая сформировалась бы на устьевом участке реки при отсутствии приливов и, как и в предыдущих случаях, определялась бы только Q_p и H_m . Уровни воды и скорости течения при паводках, а также приливных и сгонно-нагонных явлениях обычно рассчитывают с использованием системы уравнений Сен-Венана или их модификаций, например (2.1), (2.2), (2.6).

Приливы в устьях рек. Приливные колебания уровня достигают в устьях рек максимальных на земном шаре величин: до 18 м (зал. Фанди), 13 м (Пенжинская губа), 8–10 м (устье Мезени), 5–7 м (устье Северна). В дельтах рек приливы обычно меньше, чем в эстуариях, но также достигают больших значений: 5–6 м (Ганг и Брахмапутра), 3–4 м (Меконг), 5 м (Амазонка). В дельтах Сев. Двины и Печоры приливы не превышают 1–1,3 м.

На устьевом взморье на некотором удалении от дельты приливные колебания происходят относительно фонового (невозмущенного) уровня моря, приблизительно равного среднему

приливному уровню. В водотоки дельты и в целом на устьевой участок реки колебания уровня в приливную фазу проникают относительно беспрепятственно. Однако этого не происходит в отливную фазу: проникновению отлива на устьевой участок реки (особенно если имеется дельта) препятствуют мелководья устьевого взморья и особенно мелководные устьевые бары. Поэтому на устьевом участке реки приливные колебания уровня асимметричны: отливная часть кривой изменения уровня «срезается» (рис. 11). Средний приливный уровень здесь выше фонового (невозмущенного), определяемого величиной речного расхода воды. Вдали от моря наблюдаются лишь периодические повышения уровня в приливную фазу, а отливы туда не распространяются. Примеры распространения приливов на устьевые участки Печоры и Сев. Двины приведены на рис. 12 и 13.

Дальность распространения приливов в реку может быть приближенно рассчитана по формуле В. Е. Ляхницкого

$$l_{\text{пр}} = A_{\text{м}} / I_{\text{ст}}, \quad (2.25)$$

где $I_{\text{ст}}$ — «стоковый» уклон водной поверхности, $A_{\text{м}}$ — амплитуда прилива на устьевом взморье.

Фактическая дальность распространения приливов в приливных устьях крупных рек, где в межень уклоны водной поверхности очень малы, достигает 200 км и более. Несмотря на небольшие приливы (0,7 м), дальность их распространения в устье Енисея достигает 445 км. В устье Сев. Двины дальность распространения приливов 135 км, в устье Печоры — 190 км. На максимальные расстояния распространяются приливы в устьях рек Меконга (390 км), Миссисипи (400 км), Янцзы (600 км). Противоречивы данные о дальности распространения приливов в устье Амазонки. Имеются сведения, что она составляет 1400 км и что на этом протяжении можно наблюдать одновременно восемь гребней приливных волн.

Затухание и трансформация приливной волны — процесс весьма сложный. Полагают [17, 34], что приближенно приливные колебания в устье реки можно представить в виде гармоники

$$\Delta H_x = A_{\text{м}} (\cos \omega t - \varphi) \exp(-kx), \quad (2.26)$$

где ΔH_x — отклонение уровня от среднего приливного на расстоянии x от устьевого створа, $A_{\text{м}}$ — амплитуда прилива на устьевом створе (на морском крае дельты), ω — частота приливных колебаний, φ — начальная фаза, t — время. Множитель в правой части уравнения характеризует процесс затухания приливной волны.

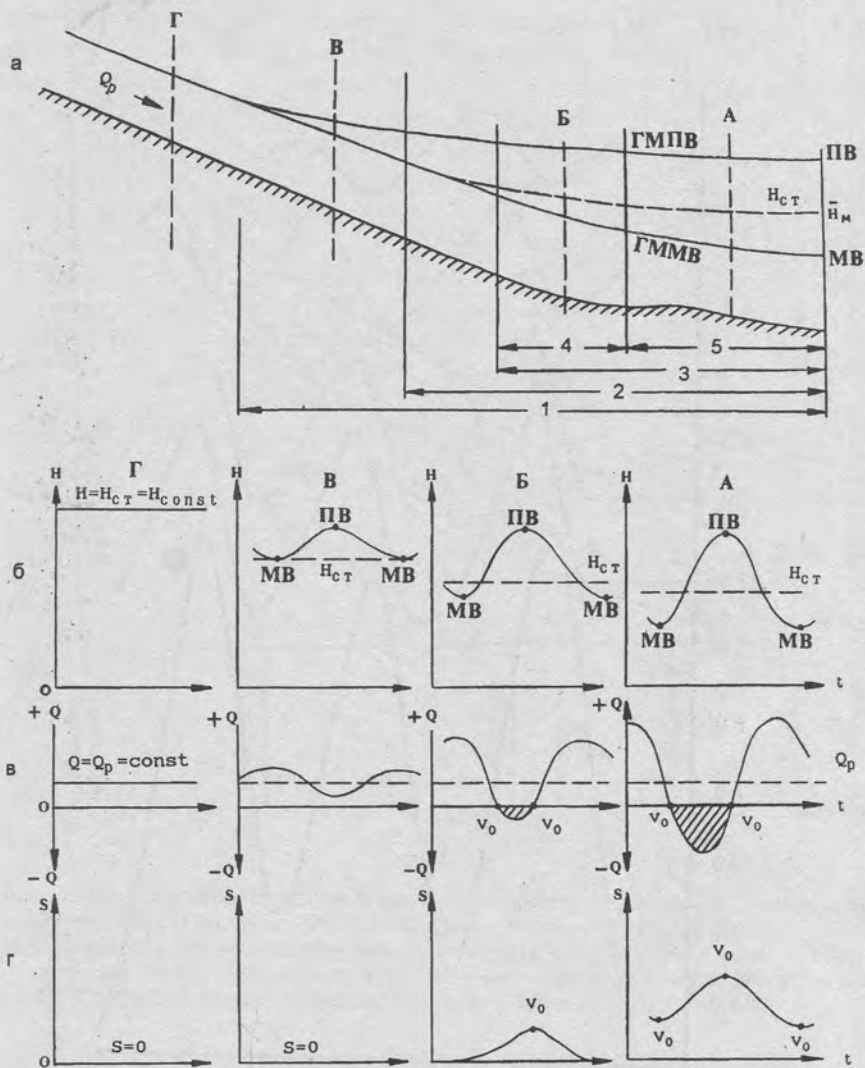


Рис. 11. Подразделение приливного участка реки на зоны (а): 1 — с приливыми колебаниями уровня, 2 — с обратными течениями, 3 — с осолоненными водами в приливную фазу (при ПВ), 4 — только в приливную фазу, 5 — только в отливную фазу; и графики изменения в течение приливного цикла уровней (б), расходов (в) и солёности воды (г) на разных створах (А—Г). Заштрихованы периоды обратных течений. ПВ — полная вода, МВ — малая вода; геометрическое место: ГМПВ — полых вод, ГММВ — малых вод; v_0 — моменты нулевых скоростей течения, H_{ct} — стокоский (невозмущенный) уровень воды, Q_p — речной расход воды, \bar{H}_m — средний уровень моря

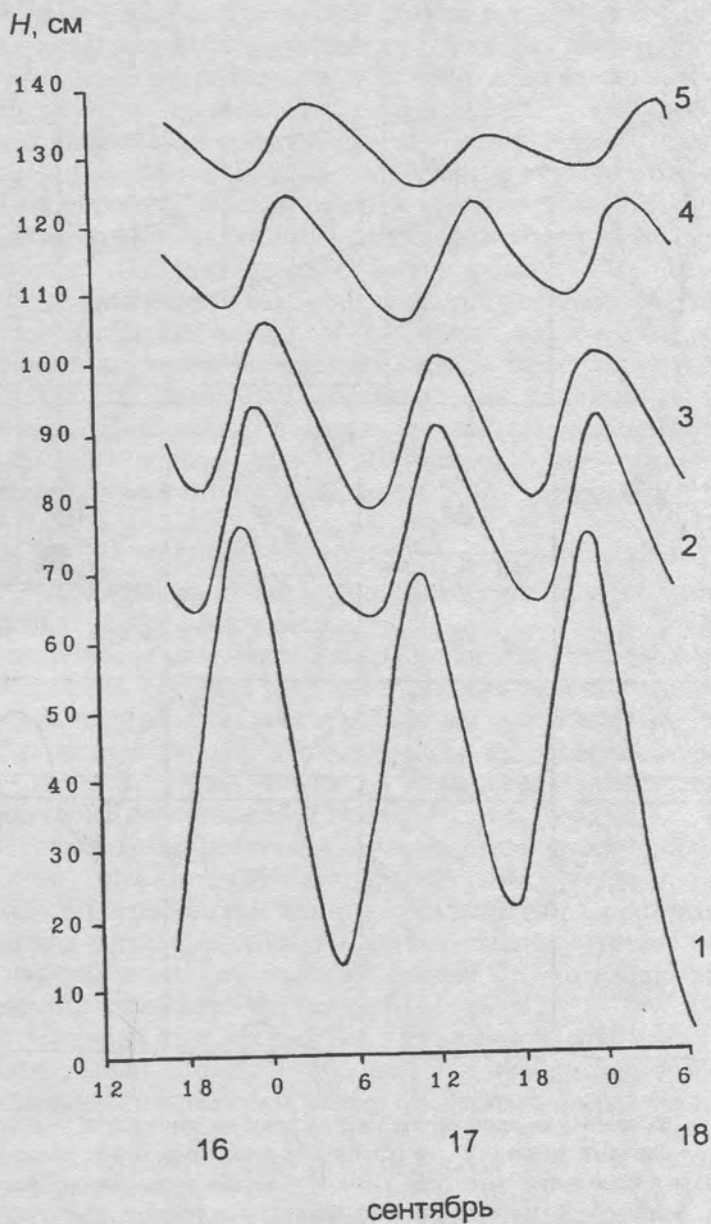


Рис. 12. Приливные колебания уровня в устье Печоры 16—18 сентября 1965 г.:
 1 — о. Зеленый (Печорская губа, устьевое взморье), 2 — Юшино (25 км от губы), 3 — Осолово (46 км), 4 — Куя (80 км), 5 — Нарьян-Мар (100 км).
 Кривые для наглядности смещены по абсолютной высоте относительно друг друга

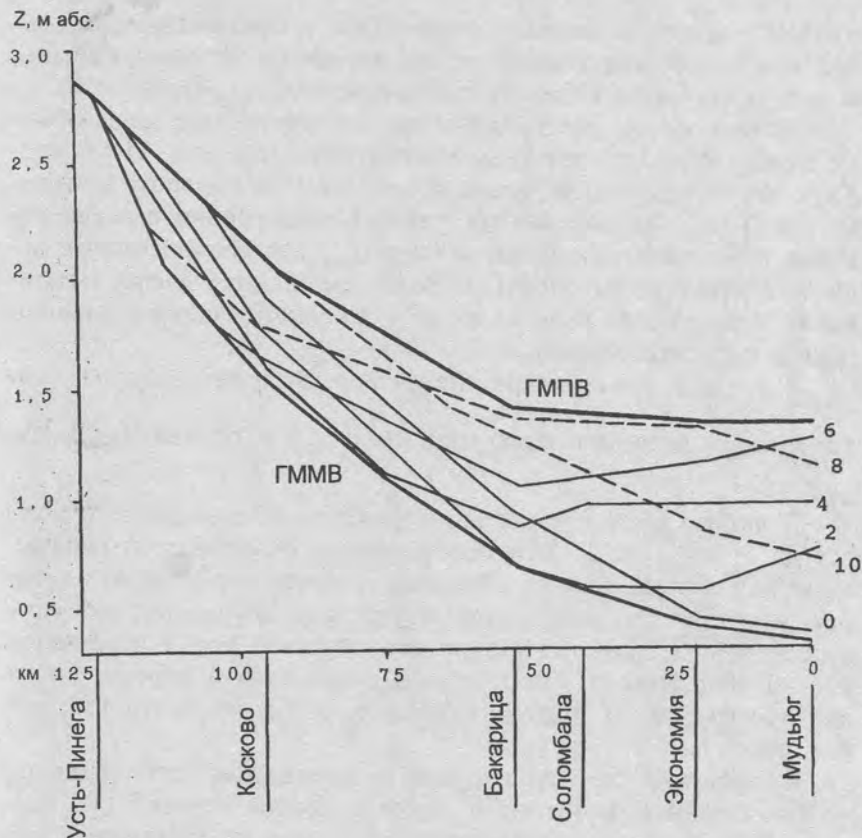


Рис. 13. Продольные профили водной поверхности в устье Сев. Двины во время прилива (17 августа 1962 г.). Цифрами обозначены целые часы относительно малой воды на устьевом взморье на посту у о. Мудьюга. ГМПВ — геометрическое место полных вод, ГММВ — геометрическое место малых вод. Сплошная линия — подъем, пунктир — понижение уровня воды

Отношение амплитуды прилива на расстоянии x от устьевого створа к этой же величине в устьевом створе A_x/A_m называют коэффициентом прилива. Эта величина уменьшается с удалением от приемного водоема тем быстрее, чем больше расход (и уклон) воды в реке.

В процессе распространения вверх по реке приливная волна трансформируется: величина прилива уменьшается, а сама волна перекашивается (время роста уровня уменьшается, время падения уровня увеличивается). Это перекашивание приливной волны в некоторых устьях рек приводит к ее обрушению — воз-

никает явление, называемое «бор» (Ганг и Брахмапутра, Янцзы, устья рек Великобритании, севера европейской части России), «барр» (Сена), «маскаре» (Жиронда), «поророка» (Амазонка).

На приливном участке реки при любом расходе воды обычно можно выделить три переменные зоны (см. рис. 11): с приливными колебаниями уровня и течений (без поворота в сторону реки) ($l_{пр}$); с приливными колебаниями уровня и реверсивными течениями в придонном слое ($l_{обр.г}$); с осолоненными водами в придонном слое (l_s). Зоны смещаются вверх и вниз вдоль приливного участка реки с изменением расхода воды реки и фазы прилива.

В третьей зоне можно, например, выделить зоны с осолоненными водами в фазы прилива ($l_{s_{пр}}$) и отлива ($l_{s_{отл}}$) (см. рис. 11).

В любую фазу прилива при фиксированном расходе воды всегда $l_{пр} > l_{обр.г} > l_s$. Эти соотношения объясняются следующим: для возникновения обратных течений необходимо не только, а существенное повышение приливного уровня; для проникновения к данному створу осолоненных вод в придонном слое необходимо, чтобы вверх по реке сначала переместились все пресные воды, находившиеся до этого ниже по течению (см. рис. 11).

Скоростная структура потока в приливном устье реки довольно сложная, особенно в периоды смены течений. Течения на разных глубинах переходят с отливного на приливное (обратное) и, наоборот, с приливного на отливное не одновременно. Отливное течение прекращается, а затем сменяется приливным вначале у дна и берегов, а затем в остальной части русла. Приливное течение прекращается, а затем сменяется отливным вначале на поверхности, а затем на глубинах. Поэтому продолжительность приливного течения у дна больше, чем у поверхности, обычно на 0,5—1,5 ч.

Характер приливных течений на устьевом участке реки, а также в эстуарии зависит от степени вертикальной стратифицированности потока (рис. 14). Переменные по направлению течения во время прилива в устье реки называют приливной циркуляцией, а в случае сильной стратификации потока — эстуарной циркуляцией. Последний термин относят и к противоположно направленным на разных глубинах осредненным приливным (остаточным) течениям или даже к разнонаправленным потокам речных и морских вод в неприливном устье, обусловленным плотностными эффектами (разд. 3.2).

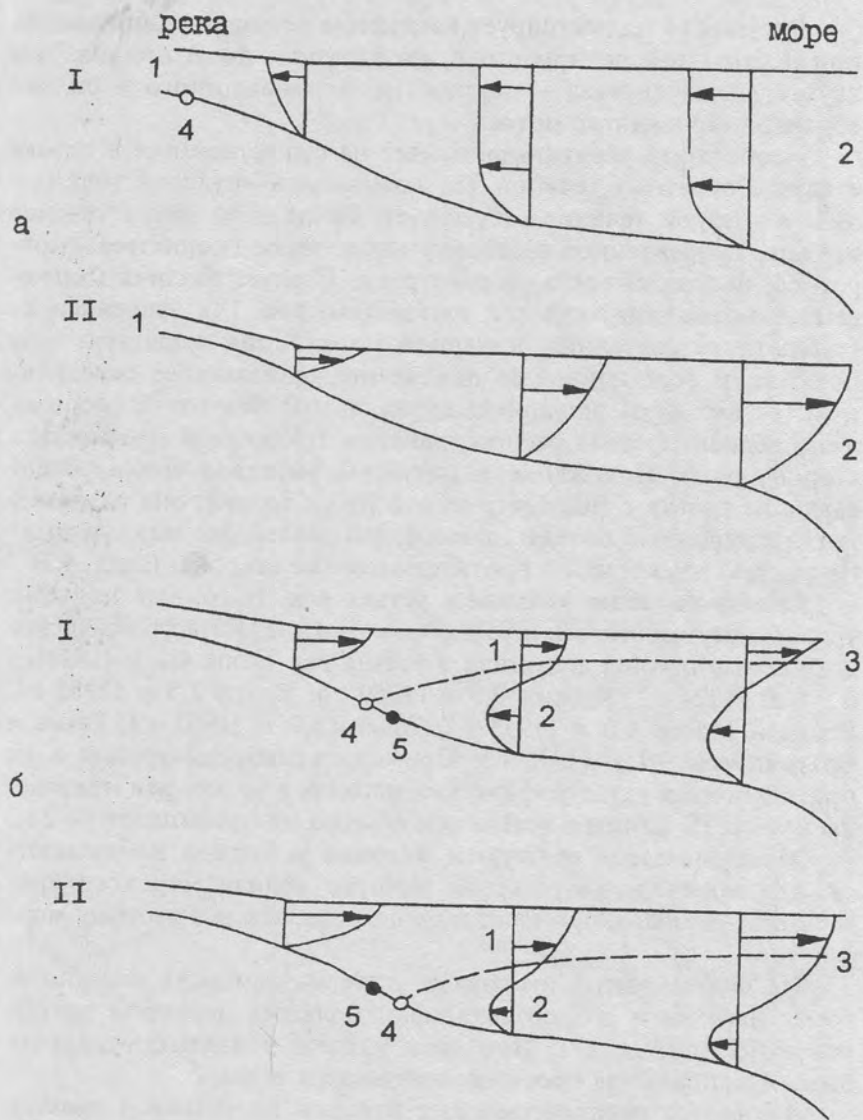


Рис. 14. Схема приливной циркуляции на устьевом участке реки или в эстуарии с полным перемешиванием (а) и с сильной стратификацией (б), по [22]: I — фаза повышения уровня воды при приливе, II — фаза понижения уровня воды при отливе; 1 — речная вода, 2 — морская вода, 3 — граница раздела речной и морской вод с различной плотностью, 4 — мгновенное положение «нулевой точки», 5 — результирующее (среднее) положение «нулевой точки». Стрелками показано направление течения

Рисунок 14 иллюстрирует изменение эстуарной циркуляции при постоянном речном стоке, но в разные фазы прилива для двух крайних случаев — полностью перемешанного и сильно стратифицированного потока.

Необходимо обратить внимание на существование в потоке в случае обратных течений так называемой «нулевой точки» у дна, в которой течение отсутствует. Выше этой точки течение прямое, направленное в сторону моря, ниже (мористее) — обратное, направленное в сторону реки. Следует различать мгновенное положение «нулевой точки» (см. рис. 14), зависящее от конкретного состояния эстуарной циркуляции в данную фазу прилива, и осредненное ее положение, освещающее осредненную (остаточную) эстуарную циркуляцию. Эта точка расположена вблизи предела распространения градиентов плотности в сторону реки. Положение и миграция «нулевой точки» очень важна не только с гидрологической точки зрения; она разделяет также придонные потоки наносов, направленные выше и ниже (мористее) этой точки в противоположные стороны (разд. 4.2).

Сгонно-нагонные явления в устьях рек. Нагонные подъемы уровня могут достигать в устьях рек 3—10 м. Катастрофические штормовые нагоны достигали в устьях рек Невы 4,2 м (1824 г.) и 3,8 м (1924 г.), Кубани 3,5 м (1969 г.), Волги 2,5 м (1952 г.), Рейна и Мааса 4,0 м (1953 г.), Эльбы 5,7 м (1962 г.), Ганга и Брахмапутры 9,1 м (1970 г.). Примеры колебаний уровня воды при некоторых катастрофических нагонах в устьях рек приведены на рис. 15. Сгоны в устьях рек обычно не превышают 1—2 м.

Максимальные величины нагонов и сгонов наблюдаются, как правило, на устьевом взморье вблизи морского края дельты и уменьшаются как вверх по реке, так и в сторону моря (рис. 16).

На полузакрытых и отмелых устьевых взморьях нередко во время нагонов и сгонов возникают большие перекосы водной поверхности (рис. 17). При этом уклоны водной поверхности бывают направлены против действующего ветра.

Дальность распространения нагонов на устьевой участок реки зависит прежде всего от величины самого нагона на устьевом взморье ΔH_m и уклона водной поверхности в реке I в предшествующий нагону период. При заданных величинах ΔH_m характер затухания нагона вдоль устьевого участка может быть оценен, как и приливы, с использованием уравнений Сен-Венана. Возможно применение и приближенных зависимостей вида

$$\Delta H_x / \Delta H_m = \exp(-kx), \quad (2.27)$$

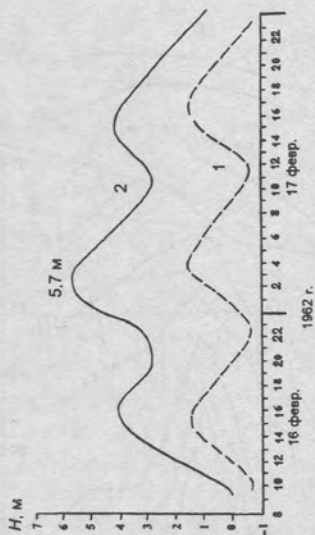
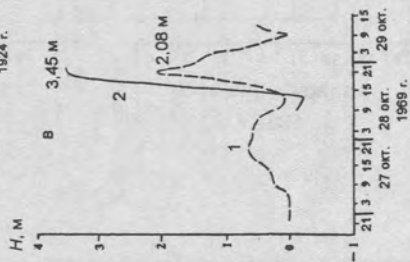
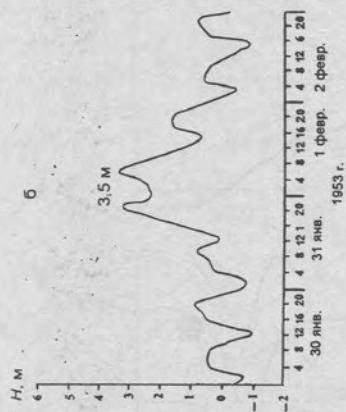
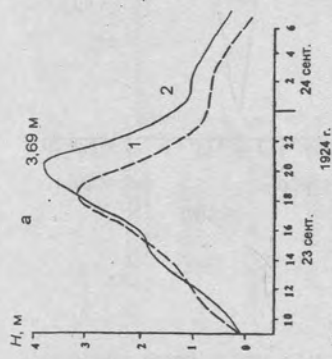


Рис. 15. Колебания уровня воды во время катастрофических нагонов в устьях рек:
 а — Невы в Кронштадте (1) и у Горного института (2) 23 сентября 1924 г.; б — Рейна у Ден Хелдера 31 января — 1 февраля 1953 г.;
 в — Кубани в Приморско-Ахтарске (1) и Чайкино (2) 28—29 октября 1969 г.; г — Эльбы в Гамбурге (1 — приливная составляющая, 2 — суммарный уровень) 16—17 февраля 1962 г.

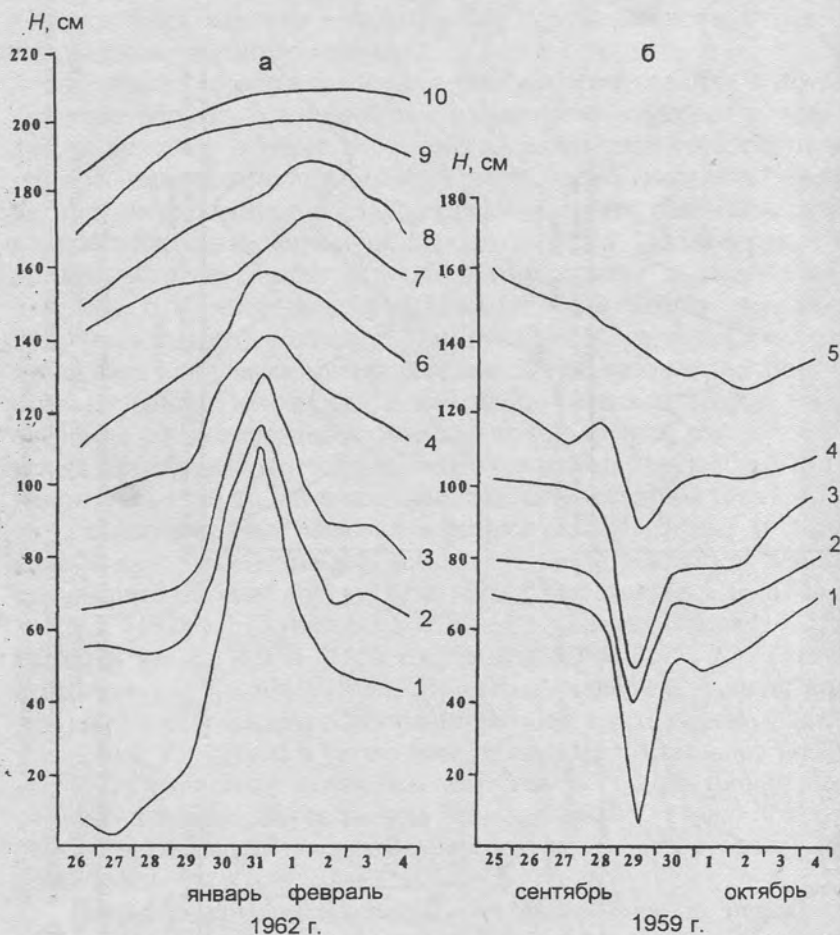


Рис. 16. Типичные графики колебаний уровня воды в устье Дуная при нагоне (а) и споне (б):

1 — Приморское (устьевое взморье), 2 — Прорва (3 км от моря), 3 — Вилково (18 км), 4 — Килия (47 км), 5 — Кислица (68 км), 6 — Измаил (94 км), 7 — Рени (163 км), 8 — Браила (206 км), 9 — Хыршова (289 км), 10 — Черновода (336 км). Кривые для наглядности смещены по абсолютной высоте относительно друг друга

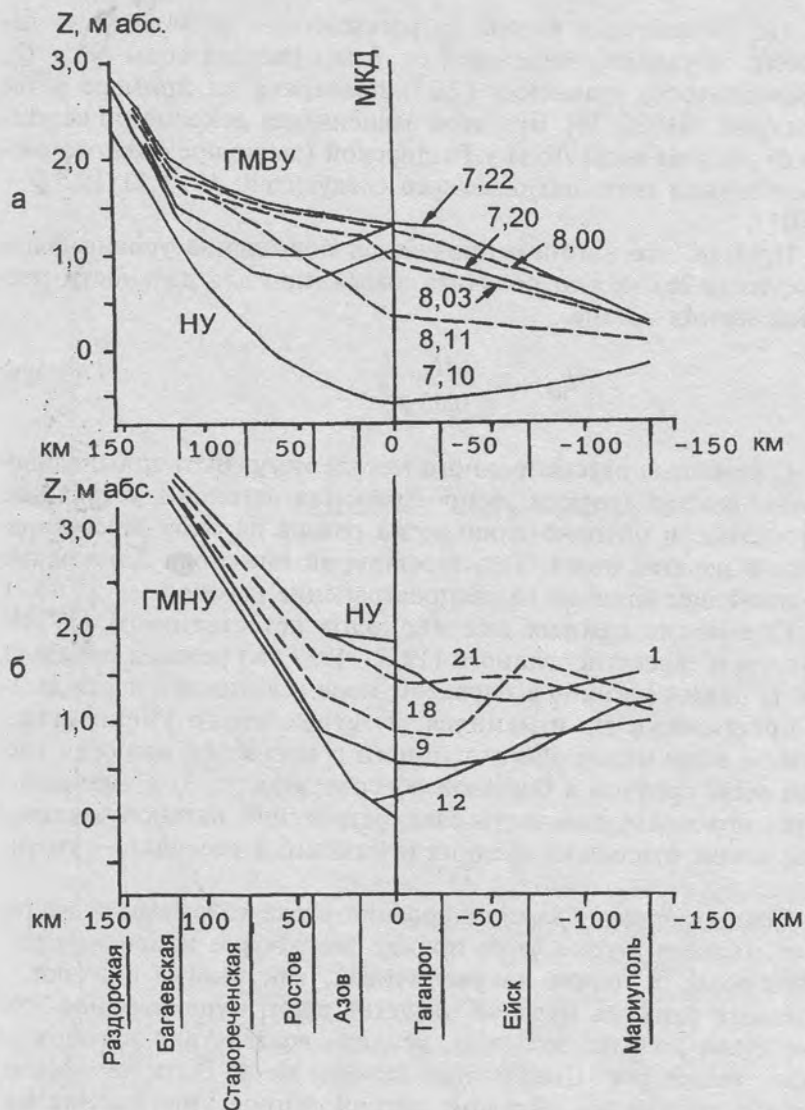


Рис. 17. Продольные профили водной поверхности в устье Дона:

а — при нагоне 7—8 июня 1961 г. Сплошная линия — фаза подъема уровня, пунктирная — фаза спада уровня после нагона. Первая цифра у линий означает число месяца, вторая — часы. НУ — начальный уровень; ГМВУ — геометрическое место наивысших уровней воды при нагоне; б — при сгоне 27 апреля 1960 г. Сплошная линия — фаза спада, пунктир — фаза подъема уровня после сгона. Цифры означают часы. НУ — начальный уровень, ГМНУ — геометрическое место наивысших уровней воды при сгоне. МКД — морской край дельты

где ΔH_x — величина нагона на расстоянии x от моря, k — декремент затухания, зависящий от l или расхода воды реки Q_p . Справедливость уравнения (2.27) проверена на примере устья Дона (рис. 18) [25, 34]. При этом зависимость декремента затухания от расхода воды Дона у Раздорской (выше предельного распространения нагонов) оказалась следующей: $k = 1,21 \cdot 10^{-5} Q + 0,011$.

Приняв, что нагоном признается повышение уровня более 5 см, из (2.26) можно получить выражение для дальности распространения нагона

$$l_{нг} = \ln \frac{\Delta H_m}{0,05} / k. \quad (2.28)$$

С помощью рассмотренного метода могут быть проанализированы многие аспекты распространения нагонов в устьях рек, и в частности оценено влияние на режим нагонов зарегулирования и изъятия стока. Так, зарегулирование стока Дона оказало следующее влияние на распространение нагонов.

Сравнение данных для периодов естественного (1934—1951 гг.) и зарегулированного (1952—1969 гг.) режима показало, что: 1) режим нагонов в Азовском море и в нижней части дельты практически не изменился; 2) существенно уменьшились расходы воды малой обеспеченности и несколько возросли расходы воды средней и большой обеспеченности; 3) в уменьшившейся половодье дальность распространения нагонов увеличилась, а при возросших средних и меженных расходах — уменьшилась.

Таким образом, зарегулирование стока сказывается на режиме нагонов в устье реки прежде всего через изменение расходов воды, в целом не увеличивая, как иногда считают, а уменьшая влияние нагонов на устье реки. Существенное изъятие стока должно, конечно, усилить воздействие нагонов на режим устьев рек. Полученные выводы могут быть перефразированы следующим образом: антропогенное уменьшение меженного стока увеличивает длину устьевой области реки, а увеличение меженного стока уменьшает длину устьевой области реки.

Все имеющиеся в литературе данные о предельной дальности распространения нагонов, конечно, весьма приближенны, так как не указывается обеспеченность этих величин.

Вопрос о дальности распространения нагонов имеет принципиальное значение при определении верхней границы устьевой области реки в случаях, когда нагоны больше приливов и

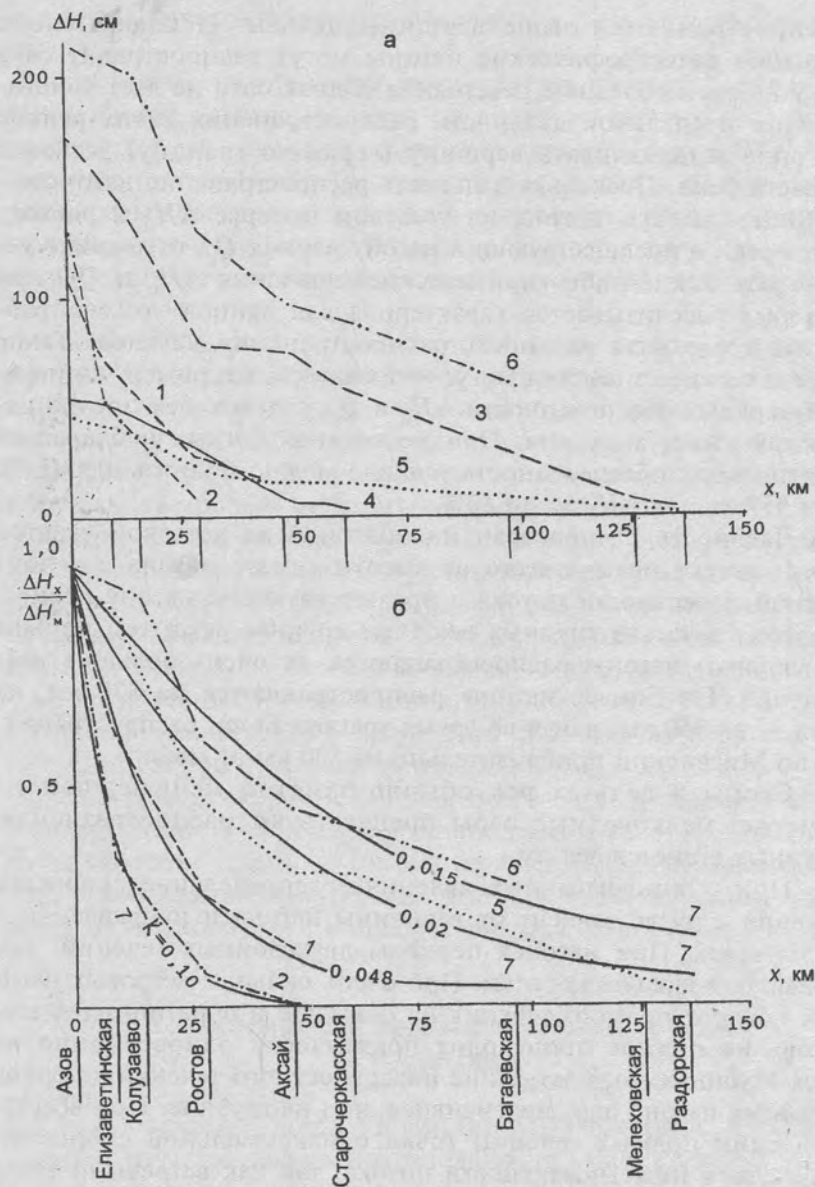


Рис. 18. Изменение абсолютной (а) и относительной (б) величины подъемов уровней воды при нагонах вдоль устьевое участка Дона.

Нагоны: 1 — 17 марта 1941 г. (расход воды у Раздорской 2620 м³/с), 2 — 8 мая 1941 г. (6830 м³/с), 3 — 22 июля 1941 г. (581 м³/с), 4 — 8 апреля 1947 г. (2800 м³/с), 5 — 31 августа 1950 г. (189 м³/с), 6 — 1 ноября 1970 г. (695 м³/с); 7 — графики экспоненциальной функции вида (2.27) с указанием декремента затухания

распространяются выше вершины дельты. Исключительно большие катастрофические нагоны могут распространяться в реку на очень большие расстояния. Однако это не дает оснований по предельной дальности распространения таких редких нагонов устанавливать вершину (верхнюю границу) устьевой области реки. Поскольку дальность распространения нагонов — функция высоты нагона на устьевом взморье ΔH_M и расхода воды реки в предшествующий нагону период Q_p , то логично установить какие-либо «критические» значения ΔH_M и Q_p , при которых рассчитывается характерная для данной устьевой области предельная дальность распространения нагонов. Такие «критические» значения могут назначаться, например, по перегибу кривых обеспеченности ΔH_M и Q_p , отделяющему редко наблюдающиеся значения. При недостатке данных наблюдений критическую обеспеченность условно можно принять для Q_p 90 или 95%, а для ΔH_M 5 или 10%.

Дальность распространения нагонов на устьевой участок реки зависит прежде всего от высоты самого нагона и уклона водной поверхности потока в предшествующий нагону период. Поэтому в устьях крупных рек (чем крупнее река, тем меньше ее уклоны) нагоны распространяются на очень большие расстояния. На Енисее нагоны распространяются на 870 км, на Оби — на 350 км; нагон во время урагана Бетси распространился по Миссисипи приблизительно на 500 км от моря.

Сгоны в дельтах рек обычно заметно меньше, чем на взморье: мелководные бары препятствуют распространению крупных сгонов в дельту.

При сгонно-нагонных явлениях распределение скоростей течения в русле зависит от величины нагона и направления и силы ветра. При нагонах периоды двухслойных течений, как правило, довольно коротки. При очень сильных ветровых нагонах поворот прямого течения на обратное и обратного течения вновь на прямое происходит практически одновременно на всех глубинах, хотя затухание поверхностного течения в период развития нагона идет интенсивнее, чем на глубине. При восстановлении прямых течений точка с максимальной скоростью опускается ниже поверхности потока, так как встречный ветер еще оказывает действие на водную поверхность. При средних и слабых нагонных ветрах может наблюдаться двухслойная циркуляция более продолжительное время: на поверхности и у берегов поток направлен в реку, у дна — к морю. Обратные течения возникают сначала у берегов, где речное течение слабее, затем распространяются в поверхностном слое на всю ширину потока, а потом захватывают все сечение русла. При ослабле

нии ветра переход обратного течения на прямое начинается у дна.

Длительность обратных течений при нагонах зависит от длительности нагонного ветра, от скорости речного течения в предшествующий нагону период и от глубины русла. Обратное нагонное течение очень быстро устанавливается в мелководных прибрежных частях русла, и часто весь эффект нагона сказывается лишь на мелководье. У подветренного берега обратное течение возникает раньше и прекращается позже, чем в остальной части русла.

Возможен случай, когда нагонная волна, проходящая с акватории моря, не сопровождается ветром нагонных направлений в самом устье. Смена течений в этом случае происходит, как при приливах: обратное течение начинается со дна, прямое, с поверхности. Иногда при нагонах одновременно наблюдаются элементы «ветровой» и «приливной» схем смены течений, что особенно характерно для глубоких дельтовых рукавов. В таких случаях обратные течения могут возникать на поверхности у берегов вследствие нагонного ветра, а у дна вследствие гидростатического эффекта, как при приливах. Однако восстановление прямого течения в обоих случаях обычно начинается со дна.

Дальность распространения в реку обратных течений ($l_{\text{обр.т}}$) и осолоненных вод (l_s) в придонном слое при нагонах обычно меньше, чем при приливах, причем всегда $l_{\text{нг}} > l_{\text{обр.т}} > l_s$.

При сгонах скорости течения обычно увеличиваются лишь в поверхностном слое. При восстановлении уровня воды после сгона скорости течения по всему сечению русла, начиная с глубин, уменьшаются, а при очень быстром подъеме уровня после сгона может произойти и поворот течения на обратное у дна.

2.6. Кинематика прямых и обратных волн в устье реки

Если закономерности кинематики прямых волн (паводков) на реках изучены достаточно детально, то кинематика обратных волн в устьях рек (волн приливов, нагонов и сгонов) исследована пока недостаточно.

Для этого необходимо применительно к устьям рек исследовать на экстремумы уравнения неразрывности (2.1); движения (2.2) и расхода воды $Q = BhV$. Такой анализ был проведен [23, 25]; полученные выводы относительно последовательности наступления экстремальных значений гидролого-морфометри-

ческих характеристик приведены в табл. 5. Там же указаны аналогичные данные, характерные для паводков.

Т а б л и ц а 5

Кинематическая схема наступления экстремальных и нулевых значений гидролого-морфометрических характеристик на устьевом участке реки

Гидрологическое явление	Последовательность наступления экстремальных и нулевых значений характеристик
Паводок	$H_{\min}; I_{\max}; s_{\max}; v_{\max}; q_{\max}; H_{\max}; I_{\min}; s_{\min}; v_{\min}; q_{\min}; H_{\min}$
Прилив — отлив — прилив без поворота течений в сторону реки	$H_{\max}; q_{\max}; v_{\max}; s_{\max}; I_{\max}; H_{\min}; q_{\min}; v_{\min}; s_{\min}; I_{\min}; H_{\max}$
Прилив — отлив — прилив с поворотом течений в сторону реки	$H_{\max}; I=0; q=0, v=0, r=0, s_{\min}, S_{\max}; q_{\max}; v_{\max}; s_{\max}; I_{\max}; H_{\min}; I=0; q=0, v=0, r=0, s_{\min}, S_{\min}; -I_{\max}; s_{\max}; -v_{\max}; -q_{\max}; H_{\max}$
Нагон без поворота течений в сторону реки	$H_{\text{нач}}; q_{\min}; v_{\min}; s_{\min}; I_{\min}; H_{\max}; q_{\max}; v_{\max}; s_{\max}; I_{\max}; H_{\text{кон}}$
Нагон с поворотом течений в сторону реки	$H_{\text{нач}}; I=0; q=0, v=0, r=0, s_{\min}, S_{\min}; -I_{\max}; s_{\max}; -v_{\max}; -q_{\max}; H_{\max}; I=0; q=0, v=0, r=0, s_{\min}, S_{\max}; q_{\max}; v_{\max}; s_{\max}; I_{\max}; H_{\text{кон}}$
Сгон без поворота течений в сторону реки	$H_{\text{нач}}; q_{\max}; v_{\max}; s_{\max}; I_{\max}; H_{\min}; q_{\min}; v_{\min}; s_{\min}; I_{\min}; H_{\text{кон}}$
Сгон с поворотом течений в сторону реки	$H_{\text{нач}}; q_{\max}; v_{\max}; s_{\max}; I_{\max}; H_{\min}; I=0; q=0, v=0, r=0, s_{\min}, S_{\min}; -I_{\max}; s_{\max}; -v_{\max}; -q_{\max}; H_{\max}; I=0; q=0, v=0, r=0, s_{\min}, S_{\max}; v_{\max}; s_{\min}; I_{\max}; H_{\text{кон}}$

Примечания.

1. Экстремальные значения характеристик, наступающие друг за другом, отделены точкой с запятой, наступающие одновременно — запятой.

2. Индексы «нач» и «кон» относятся к уровню в начале и конце нагона (сгона).

3. S — средняя по сечению соленость воды (в тех случаях, когда в устье проникают осолоненные воды взморья).

4. s — средняя мутность (минимальное ее значение, отвечающее условию $v=0$, превращается в нулевое для крупных фракций наносов); q и r — удельные расходы воды и наносов.

5. Отрицательные величины относятся к случаю обратных течений.

Проведенный анализ кинематики прямых и обратных волн в устьях рек (табл. 5) позволяет сделать следующие основные выводы [23, 25].

Максимумы характеристик потока в прямой положительной волне и минимумы характеристик потока в прямой отрицательной волне в устье реки (паводковая волна) наступают в такой последовательности во времени: вначале экстремумы уклона, затем экстремумы скорости течения, расхода воды и, наконец, уровня воды или глубины.

При движении обратной отрицательной волны (отлив, сгон) вначале наступают максимумы расхода воды, скорости течения, уклона, а затем минимум уровня воды.

В обратной положительной волне (прилив, нагон) без поворота течений в сторону реки последовательность экстремумов такова: минимумы расхода воды, скорости течения, уклона, максимум уровня воды.

В том случае, когда движение обратной положительной волны (прилив, нагон) сопровождается возникновением обратных течений, последовательность наступления экстремумов изменяется: вначале наступает максимум обратной величины уклона, затем — максимумы обратных величин скорости течения и расхода воды, максимум уровня. Для этого случая характерны моменты перехода некоторых характеристик потока через нуль, что предшествует повороту течений в сторону реки. Это моменты нулевого уклона и несколько запаздывающий по отношению к нему момент нулевой скорости течения и нулевого расхода воды. При восстановлении течения в сторону приемного водоема нулевые значения характеристик потока следуют за максимумом уровня воды: сначала наступает момент нулевого уклона, а затем — момент нулевой скорости течения и нулевого расхода воды.

Таким образом, в последовательности наступления экстремумов характеристик потока в прямой (паводок) и обратной положительной волне (прилив, нагон) в случае поворота течений в сторону реки имеется много общего. Кинематика же обратной отрицательной волны (отлив, сгон) и обратной положительной волны (прилив, нагон) без поворота течений существенно отличается от кинематики волны паводка.

Полученные выводы подтверждаются данными наблюдений (рис. 19, а).

Важно отметить, что по кинематической схеме наступления экстремумов гидролого-морфометрических характеристик сгонно-нагонные явления в принципе не отличаются от приливных.

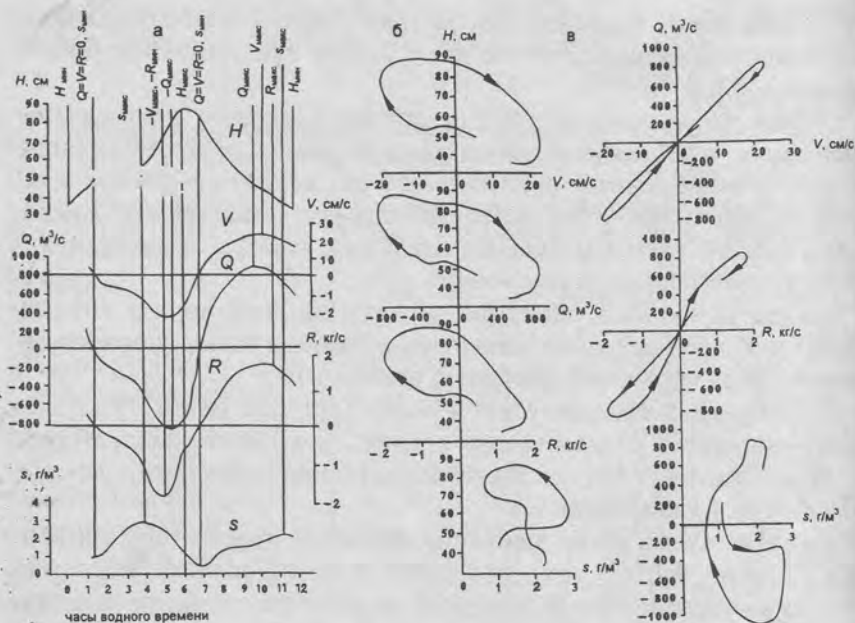


Рис. 19. Типичные для приливного устья реки (Корабельный рукав в дельте Сев. Двины, 15 марта 1960 г.) графики изменения характеристик потока в течение приливного цикла (а), графики зависимости характеристик потока от уровня (б) и от расхода воды (в):

H — уровень воды, Q — расход воды, v — средняя скорость течения, R — расход взвешенных наносов, s — средняя мутность воды

Дополнительный учет действия ветра в уравнении движения, по-видимому, также не нарушит описанной кинематической схемы. Однако в отличие от периодических приливных явлений сгонно-нагонные явления, как правило, проявляются в виде одиночных волн, приходящих на фоне относительно стабильного уровня. Поэтому эти явления имеют некоторые особенности (табл. 5).

Найденные закономерности кинематики длинных волн в устье реки позволяют объяснить многие явления, происходящие в устьях рек при неустановившемся режиме. Сделанные выводы, по-видимому, не потеряют своего значения и при более сложных условиях: переменной ширине русла, наличии поймы, влиянии градиентов плотности, многорукавности русла, сложении колебаний уровня воды различного происхождения и т. п.

Связь между гидролого-морфометрическими характеристиками потока и русла. На основе проведенного анализа последовательности наступления экстремальных и нулевых значений характеристик потока и русла в устье реки можно получить качественный вид кривых связи между различными характеристиками потока [23, 25].

Кривые связи характеристик потока с уровнем и расходом воды в прямой волне типичны для обычных рек и в общем однотипны, они представляют собой наклоненные эллипсы (петли) с ветвью подъема и ветвью спада (см. рис. 10, а).

При реверсивных (изменяющих направление) течениях в случае обратной волны на кривых связи отмечаются точки перехода характеристик через нуль.

Графики $v=f(q)$ и $I=f(q)$ для обратной волны имеют две неравные петли, относящиеся к фазе прилива (нагону) и фазе отлива (сгону). Эти петли могут быть симметричны относительно начала координат только в том случае, когда речной расход в русле равен нулю и продолжительности прямого и обратного течений равны. В противном случае отливная (сгонная) часть петель должна быть больше приливной (нагонной). Если поворота течений при прохождении обратной волны не происходит, то на графиках остаются лишь положительные части петель. Пример подобных связей для приливного устья Сев. Двины приведен на рис. 19, б и в.

2.7. Распределение и перераспределение стока воды по рукавам дельт

Распределение стока воды по дельтовым рукавам и их системам определяется соотношением гидравлических сопротивлений водотоков и их систем. Поскольку во времени эти сопротивления изменяются, происходит и перераспределение стока воды по рукавам.

Для простейшей иллюстрации этих положений применим уравнение квазиравномерного движения воды (2.21) к двум смежным дельтовым рукавам (1 и 2) с общим узлом деления, сливающимся ниже по течению или впадающим в одно и то же приглубое устьевое взморье. Рассматривая лишь случай прямых (в сторону моря) течений, относя уравнение (2.21) к смежным

рукавам и заменяя модуль сопротивления F на $Ln^2 / \left(B^2 h^{\frac{10}{3}} \right)$

(см. разд. 2.2), получим:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \sqrt{\frac{F_2}{F_1}} = \left(\frac{L_2}{L_1}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{n_2}{n_1}\right) \left(\frac{B_1}{B_2}\right) \left(\frac{h_1}{h_2}\right)^{\frac{5}{3}}, \quad (2.29)$$

где L — длина рукавов, B и h — их средняя ширина и глубина, n — средний коэффициент шероховатости.

Из уравнения (2.29) следует, что любое естественное или антропогенное, обратимое или необратимое изменение L , B , h , n (удлинение или укорочение рукавов, их расширение и углубление или, наоборот, сужение и обмеление, изменение шероховатости русла) ведет к изменению распределения расходов воды между смежными рукавами. При этом неважно, в обоих рукавах происходят изменения их морфометрических характеристик или лишь в одном из них. Доля стока данного рукава возрастает при уменьшении его длины и шероховатости, увеличении ширины и глубины, или при изменениях в смежном рукаве противоположного характера. Особенно сильно сказывается изменение глубины русла.

При сложной системе дельтовых водотоков изменение размеров русла лишь в одном звене системы распространяется на всю систему, причем не только вниз, но и вверх по течению, вплоть до вершины дельты.

Различают многолетнее, сезонное и кратковременное перераспределение стока воды в дельтах. Основными причинами *многолетнего* (как правило, необратимого) перераспределения стока воды в дельте являются морфологические процессы (см. гл. 5) и гидротехнические мероприятия в водотоках дельты, приводящие к изменению их гидравлических сопротивлений.

Крупномасштабное перераспределение стока в дельтах обычно связано с прорывами рукавов и крупной перестройкой гидрографической сети дельт (как в устьях рек Амударьи, Терек-ка, Или, Хуанхэ и др.). В дельтах с более спокойным русловым режимом (устья Волги, Дуная, Кубани и др.) происходят более медленные процессы перераспределения стока по дельтовым водотокам, связанные с морфологическими процессами, изменяющими длину и поперечные размеры водотоков: устьевым удлинением, меандрированием водотоков, их заилением, размывом и т. д. Наибольшее влияние на перераспределение стока оказывает дробление водотоков, сопровождающееся уменьшением их глубины.

Существенное влияние на многолетнее перераспределение стока воды по рукавам оказывают водохозяйственные меропр-

ятия в дельтах. Расчистка отмирающих рукавов и сооружение новых каналов привели к заметному перераспределению стока в дельтах Терека, Амударьи, Кубани. В других случаях к перераспределению стока приводят мероприятия по улучшению суходонных условий в рукавах дельты. Проведенные в дельте Дуная в 1880—1902 гг. мероприятия по углублению и спрямлению одного из основных рукавов — Сулинского — вызвали долговременные процессы перераспределения стока в этот рукав. В дельте Волги вследствие сооружения Волго-Каспийского канала увеличилась доля стока рукава Бахтемир, в дельте Дона углубление рукава Песчаного в 1927—1928 гг. привело к резкому увеличению доли стока этого рукава.

К многолетнему необратимому перераспределению стока по водотокам дельт часто ведут процессы и мероприятия вне пределов рассматриваемой дельтовой системы и непосредственно на ее морфометрические характеристики не влияющие. К таким процессам и мероприятиям относятся прежде всего те, которые изменяют величину поступающего в дельту или ее частную русловую систему стока воды (климатические изменения, крупные прорывы русла выше по течению, изъятие или зарегулирование стока реки, сооружение водodelителей и т. д.).

Изъятие стока воды в самой реке или в дельте приводит к сосредоточению стока в наиболее крупных водотоках (дельты Дона и Кубани). К таким же процессам приводит длительное и прогрессивное снижение уровня приемного водоема (дельта Амударьи).

Сезонное перераспределение стока в дельтах рек, как правило, обратимо и связано прежде всего с непропорциональным изменением глубины и, следовательно, гидравлических сопротивлений в смежных водотоках во время прохождения волны половодья. С уменьшением стока воды реки и уровней воды в дельте на спаде половодья увеличивается доля стока тех дельтовых водотоков, которые имеют относительно большие глубины, лучшие условия поступления воды в водоток (более глубокие истоки) и более глубокие устьевые бары. При повышении уровня во время половодья, наоборот, увеличивают свою долю стока более широкие и мелкие рукава. Увеличение доли стока дельтового рукава со снижением водности самой реки — надежный признак при определении тенденции рукава к его активизации и размыву (см. также разд. 5.3 и 5.4).

Сезонное регулирование стока реки обычно приводит к уменьшению доли стока более широких и мелких рукавов в половодье и увеличению в межень.

Кратковременное перераспределение стока в дельтах обычно связано с приливными и сгонно-нагонными явлениями. При понижении уровня воды на устьевом взморье (отлив, сгон) доля стока более глубоких рукавов увеличивается, более мелких — уменьшается.

В многорукавных дельтах при значительных нагонах возникает характерная циркуляция: при нагоне в маловодных небольших водотоках создаются обратные течения, достигающие истоков этих рукавов. В более крупных водотоках сохраняется сток в сторону водоема. При сгонах увеличивается сток прежде всего в глубоких рукавах. Особенно сильно возрастают расходы воды (и в абсолютных и в относительных величинах) в рукавах с искусственно углубленным для целей судоходства устьевым баром. Так, углубленный рукав Песчаный в дельте Дона при сильном сгоне сосредоточивает в себе почти всю донскую воду. Бары в устьях других рукавов при сильных сгонах полностью или частично осыхают, и сток по ним практически прекращается.

2.8. Затопление дельт

Если уровни воды в водотоках дельты превысят некоторые критические отметки (большие в верхней и меньшие в нижней части дельты), то начинается процесс заполнения водой понижений дельтового рельефа — *затопление дельты*. Обычно затопление дельты бывает обусловлено повышением уровней воды в половодье или паводки. Этот вид затопления называют *заливанием* дельты. Заливание дельты, особенно если оно связано с половодьем, в естественных условиях обычно наступает регулярно. Размеры заливания и его продолжительность зависят от величины и длительности половодья (паводка). Заливание свойственно крупным низменным дельтам с ежегодным половодьем, связанным либо с таянием снегов в бассейне реки (дельты Волги, Дуная), либо с муссонными дождями (дельты Ганга и Брахмапутры, Меконга). Так, в половодье 1966 г. в дельте Волги было залито 70% ее площади; при максимальном уровне катастрофического половодья 1926 г. было залито почти 90% площади дельты. В половодье 1941 и 1942 гг. в дельте Дуная было затоплено почти 95% ее площади. Примеры зависимости площадей и объемов заливания от уровней воды для дельт Волги и Дуная приведены на рис. 20.

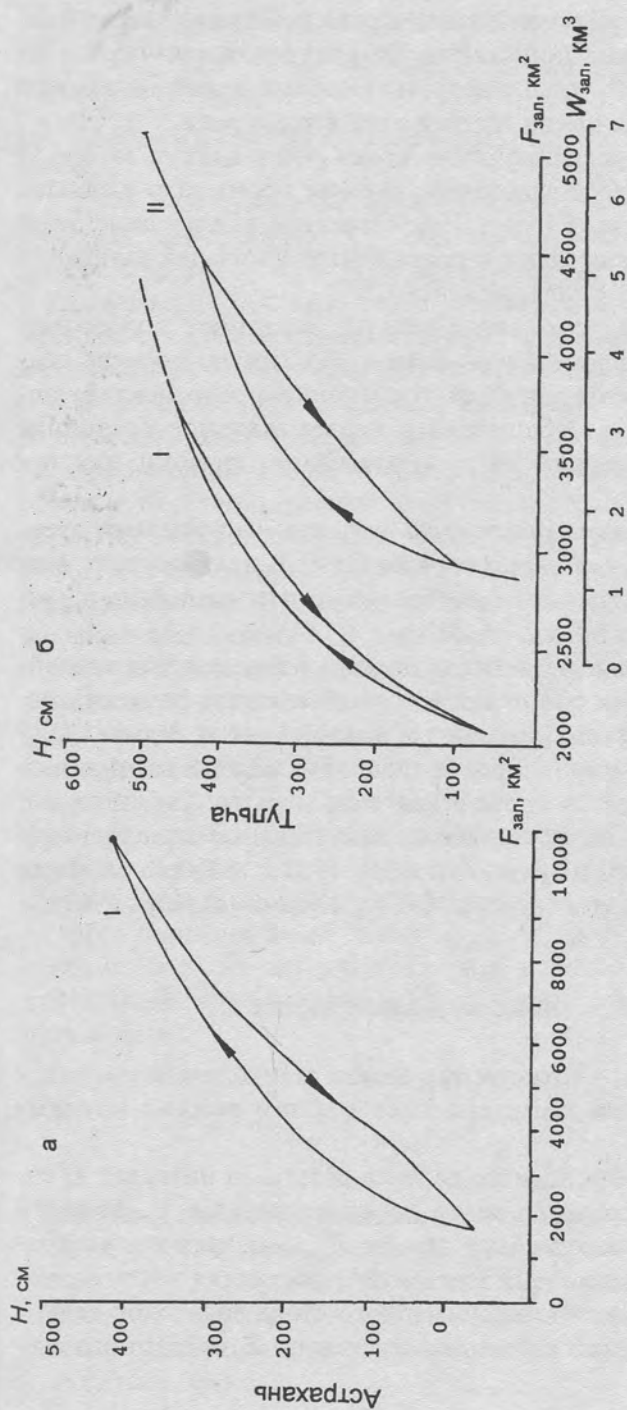


Рис. 20. Зависимость площади F (I) и объемов W (II) заливания дельт от уровня воды:

а — дельта Волги; б — дельта Дуная. Стрелками показаны фазы подъема и спада уровня воды

В фазу подъема уровней воды в реке огромные массы воды заполняют дельтовые понижения; на спаде уровней часть этих вод возвращается в рукава дельты. Поэтому дельта оказывает регулирующее влияние на водный сток в устье реки.

Изъятие и зарегулирование стока реки влекут за собой уменьшение площадей заливания, как уже произошло в дельтах Волги, Терека, Дона, Кубани. Искусственное обвалование дельтовых островов также ведет к сокращению площадей заливания (дельты рек Дуная, Волги, Красной).

Заливание, т. е. затопление дельты, вызванное половодьем или паводком, — процесс в основном обратимый: по мере спада уровней заливание уменьшается и вовсе прекращается; поверхность дельты возвращается в первоначальное состояние (исключение составляют лишь образование промоин или наилка).

Затопление дельты может быть вызвано и прорывами русел водотоков в процессе дельтообразования. В этих случаях возможны катастрофические и необратимые изменения гидрографической сети дельты (см. гл. 5).

Затопление дельты иногда происходит в результате воздействия морских факторов — прежде всего катастрофических нагонов. В этих случаях говорят о *наводнениях в дельте*. Они обычно менее регулярны, чем заливание в половодье, и затопляется при этом лишь приморская зона дельты. Так, штормовыми нагонами были обусловлены значительные наводнения в дельтах Ганга и Брахмапутры (ноябрь 1970 г.), Рейна и Мааса (февраль 1953 г.), Волги (ноябрь 1952 г.), Кубани (октябрь 1969 г.).

2.9. Водный баланс дельт

Водный баланс (соотношение между приходом и расходом воды) — важнейшая характеристика водного режима крупных дельт.

Приходную часть водного баланса дельты за интервал Δt составляют приток речных вод в вершине дельты Y_p , боковой приток с местного водосбора дельты $Y_{\text{мест}}$, осадки на поверхность дельты X , подземный приток W_1 ; расходная часть водного баланса складывается из суммарного стока водотоков дельты в море ΣY_i , испарения с поверхности дельты Z , подземного стока W_2 .

Полное уравнение водного баланса дельты имеет вид

$$Y_p + Y_{\text{мест}} + X + W_1 = \sum Y_i + Z + W_2 \pm \Delta U, \quad (2.30)$$

где $\pm \Delta U$ — изменение запасов воды в дельте за интервал времени Δt .

Y_p , $Y_{\text{мест}}$ и иногда $\sum Y_i$ определяют гидрометрическим путем. Для дельт крупных рек $Y_{\text{мест}}$ обычно мало по сравнению с Y_p , и им пренебрегают. W_1 и W_2 с трудом поддаются точной оценке, и для больших рек ими также пренебрегают. X определяют по данным сети метеостанций в пределах дельты. Наибольшие сложности возникают при оценке величины Z .

Испарение воды в дельтах складывается из испарения с водной поверхности (Z_b), испарения с сухой поверхности дельты, покрытой (Z'_c) и не покрытой (Z''_c) растительностью, испарений с покрытых растительностью залитых площадей дельты (Z_3). Перечисленные виды испарения нередко объединяют. Важную роль играет в дельтах испарение растительностью (транспирация). В оценке транспирации в дельтах имеются большие расхождения. В зависимости от типа растительности, характера затопления местности, климатических особенностей, а также принятой методики она оценивается в разных условиях в диапазоне 1100—1600 мм в год. Поскольку точное определение площадей, занятых в дельтах различными угодьями, весьма затруднительно (надо иметь в виду и постоянное изменение этих площадей, в частности вследствие переменного режима заливания дельты), все оценки суммарных потерь воды на испарение в дельтах весьма приближенны.

Для больших дельт вклад $Y_{\text{мест}}$, W_1 и W_2 в водный баланс невелик. В таких случаях уравнение водного баланса дельты за длительный интервал времени, например год, можно представить в виде

$$Y_p + X = \sum Y_i + Z \quad (2.31)$$

или

$$\sum Y_i - Y_p = X - Z. \quad (2.32)$$

Если $X > Z$, то в пределах дельты сток воды увеличивается, если $X < Z$, то уменьшается (в этом случае говорят о *потерях стока*). Для дельт, расположенных в условиях избыточного увлажнения, характерно $X > Z$ и добавление стока; для дельт в условиях недостаточного увлажнения, наоборот, $X < Z$ и потери стока (табл. 6).

2.10. Течения на устьевом взморье

Течения на устьевом взморье в основном определяются стоком реки и его распределением по рукавам дельты, ветром, приливами, градиентами плотности воды, волнением. Соответственно этим факторам течения на устьевом взморье часто подразделяют на стоковые, ветровые, приливные, плотностные и волновые.

Т а б л и ц а 6

Водный баланс некоторых дельт

Дельта	Период, годы	Y_p , км ³ /год	$\Sigma Y_i - Y_p$, км ³ /год	% к Y_p
Волги	1936—1970	248	-10,8	-4,4
Дуная	1921—1965	198	-3,62	-1,8
Амударьи	1963—1964	46,0	-4,63	-10,0
Терека	1946—1973	8,2	-1,69	-20,6
Меконга	1960—1965	468	36	7,7
Красной	1950—1985	119	15,7	13,1
Ганга и Брахмапутры	—	640	64	10

Наиболее специфичны *стоковые течения*. С точки зрения физики процесса втекание речного потока в водоем представляет собой инерционно-гравитационно-плотностное течение (см. разд. 2.2). Если отсутствуют градиенты плотности, то это течение будет инерционно-гравитационным, если можно пренебречь уклоном водной поверхности, то инерционно-плотностным, если же отсутствуют и градиенты плотности, и уклоны водной поверхности, то просто инерционным. Последний случай отвечает условиям втекания речного потока в приглубый водоем. Гашение скоростей течения вдоль речной струи будет описываться уравнением (2.12), которое можно привести к более простому виду, заменив $g/(\alpha_2 C^2)$ на некоторый коэффициент k , суммарно учитывающий все сопротивления движущейся речной струе, т. е. трение на дне, если поток распространяется до дна, и трение о соседние водные массы. Тогда получим

$$\frac{v_x}{v_0} = \exp\left(-k \frac{x}{h_0}\right), \quad (2.33)$$

где v_0 и h_0 — скорость течения и глубина в устьевом створе (точнее, на гребне устьевого бара), v_x — средняя скорость течения на расстоянии x . По данным наблюдений [23, 25], во многих устьях рек величина коэффициента k изменяется в довольно узких пределах: от 0,002 до 0,003 (рис. 21). Этот же рисунок подтверждает тот факт, что речные струи на приглубом устьевом взморье разных рек динамически подобны. Кроме того, заметна роль уклона водной поверхности на отмелем взморье (устье Волги). В этом случае скорости течения затухают вдоль речной струи медленнее, чем на приглубом взморье, что соответствует уравнению (2.10).

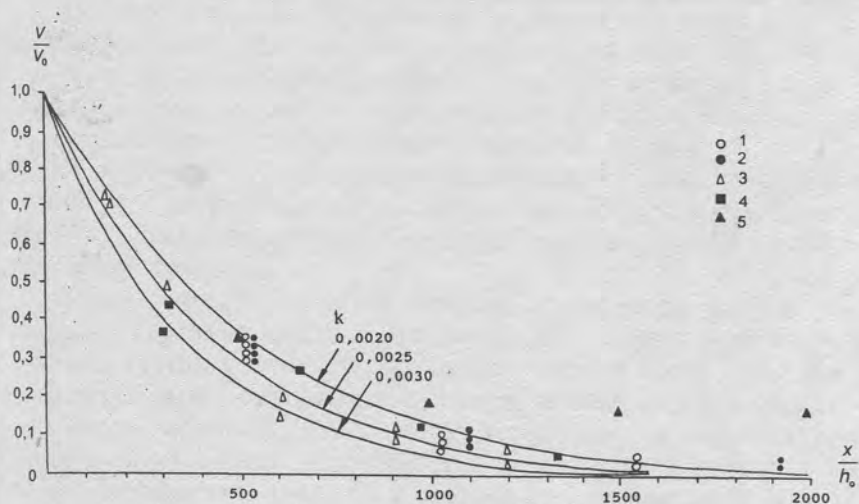


Рис. 21. Изменение средних скоростей течения вдоль речной струи на открытом устьевом взморье.

Устья: 1 — Кубани, 2 — Куры, 3 — Дуная, 4 — Амударьи, 5 — Волги. Кривые построены по уравнению (2.33) при различных значениях k

При отсутствии бокового ветра и значительных вдольбереговых течений речная струя на приглубом устьевом взморье при втекании реки в водоем с более плотной водой — это раструб в поверхностном слое с резким расширением в начальной части. Толщина пресноводного верхнего слоя в струе в сторону моря быстро уменьшается. Достаточно боковому ветру вызвать вдольбереговое течение, чтобы вся струя («шлейф», «факел» мутных речных вод) развернулась бы по ветру (течению) и прижалась к берегу.

Течения всех остальных видов, кроме стоковых, мало отличаются от обычных морских течений в прибрежной зоне моря. Однако по сравнению с открытой частью моря течения на мелководном устьевом взморье испытывают больше влияния рельефа дна и конфигурации берегов. Ветровые течения, например, обычно имеют ярко выраженные вдольбереговые составляющие. При расчете таких течений вместо вектора скорости W в формуле (2.22) необходимо учитывать проекции скорости ветра на направление, параллельное линии берега.

Реальные течения на устьевом взморье — сумма течений разных видов. При этом вклад стоковых (инерционных) и ветровых течений в суммарные течения наиболее весом.

Глава 3. СМЕШЕНИЕ РЕЧНЫХ И МОРСКИХ ВОД В УСТЬЯХ РЕК

3.1. Устьевая зона смешения

Во всех устьях рек, впадающих в водоем с соленой или солоноватой водой, формируется хорошо выраженная *зона смешения*, в пределах которой соленость воды возрастает от солености, свойственной речной воде (обычно не более 0,2—0,5‰), до солености морской воды (10—40‰ в разных морях).

В пределах зоны смешения радикально изменяется солевой состав вод: речная вода гидрокарбонатного класса и кальциевой группы трансформируется в морскую воду хлоридного класса и натриевой группы.

Кроме того, изменяется и температура воды, причем по-разному в разные сезоны. Например, в условиях умеренного климата (устья Волги, Дуная, Терека) весной вдоль зоны смешения температура воды уменьшается, осенью — возрастает.

Таким образом, зона смешения речных и морских вод представляет собой зону контакта между двумя первичными водными массами (речной и морской) с весьма различными физико-химическими (и можно добавить — гидробиологическими) свойствами.

Положение зоны смешения зависит от величины речного стока, емкости взморья, фазы прилива, ветра и сгонно-нагонных явлений. Поэтому эта зона испытывает как сезонные, так и кратковременные изменения (рис. 22).

Большая часть зоны смешения обычно находится на устьевом взморье (открытом, полузакрытом). Здесь создается область опреснения, площадь которой зависит от речного стока, глубин и направления ветра.

Между морским краем дельты и зоной смешения во многих случаях (особенно на отмелем взморье) можно выделить так называемую пресноводную зону, или зону транзита. В ее пределах соленость воды не превышает 1‰. Иногда за границу зоны транзита (речную границу зоны смешения) принимают изогалину 2‰.

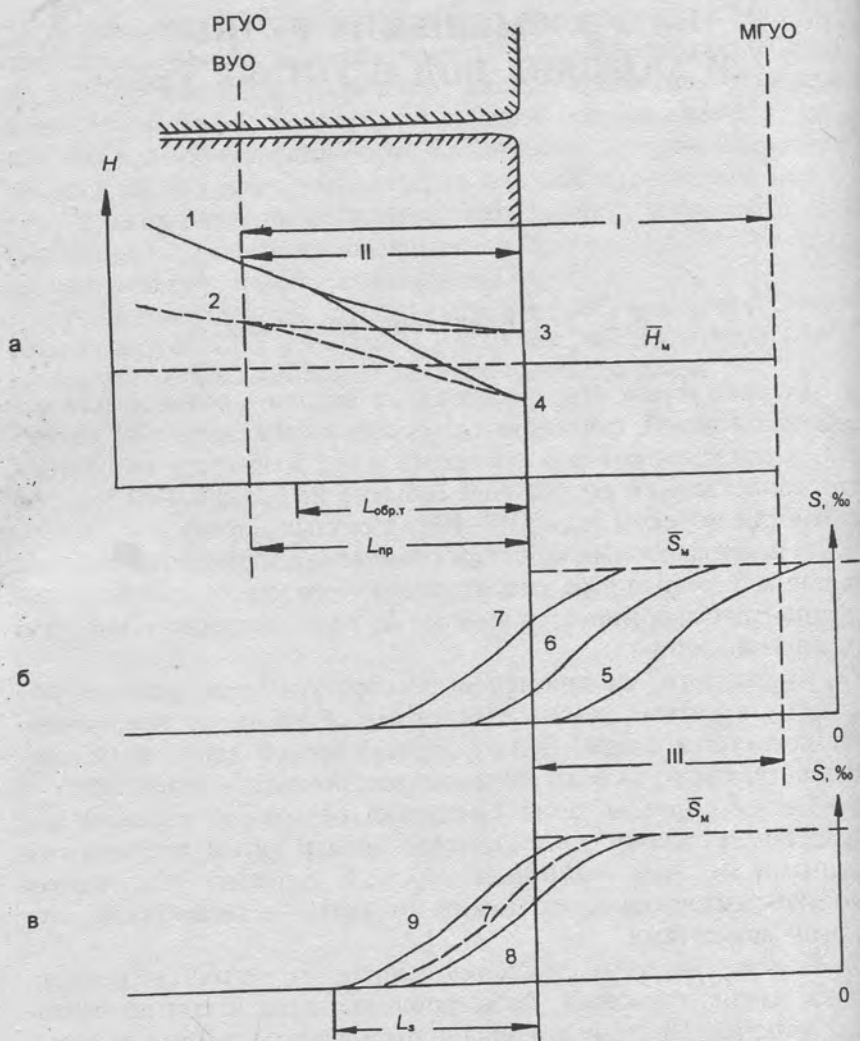


Рис. 22. Схема устьевой зоны смешения:

а — продольные профили водной поверхности в половодье (1), межень (2), прилив (3), отлив (4); б — продольные профили осредненной за приливный цикл солёности воды в половодье (5), при средних расходах воды (6), в межень (7); в — продольные профили солёности воды в межень в среднем за приливный цикл (7), при смене течений в отлив (8), в прилив (9).

I — устьевая область реки, II — устьевой участок реки, III — устьевое взморье. Участки: $L_{пр}$ — приливный, $L_{обр.т}$ — с обратными течениями, L_s — с осолоненными водами. РГУО (ВГУО) — речная граница (вершина) устьевой области;

МГУО — морская граница устьевой области; \bar{H}_M — средний уровень моря;

\bar{S}_M — средняя солёность вод моря

В пределах зоны смешения всегда находится область наиболее активного взаимодействия и смешения речных и морских вод, где горизонтальные и вертикальные градиенты всех гидролого-гидрохимических характеристик (и прежде всего солёности воды) наибольшие. Эту область называют *фронтальной зоной*. Морская граница этой зоны часто определяется по изогалине, отличающейся на 10% от средней солёности вод моря. Положение морской границы фронтальной зоны в половодье совпадает с морской границей устьевого взморья и устьевой области в целом (см. разд. 1.3).

Внутри фронтальной зоны выделяют наклонную поверхность раздела между речной и морской водными массами, совпадающую с геометрическим местом максимальных горизонтальных и вертикальных градиентов гидролого-гидрохимических характеристик, — *фронтальный раздел*. Линию пересечения («след») фронтального раздела с любой горизонтальной плоскостью, в частном случае с поверхностью моря, называют *фронтом* или *гидрофронтом*.

Увеличение солёности воды продолжается и мористее устьевого взморья (фронтальной зоны), в пределах *предустьевого пространства моря*.

Речная и морская границы фронтальной зоны, а также изогалины в зоне смешения смещаются в сторону моря в периоды повышенного речного стока, сгонного ветра и пониженного уровня моря. На приглубом взморье речные воды распространяются в половодье в сторону моря, как правило, в виде «языков» против крупных рукавов и в основном в поверхностном слое. Нередко формируется слой довольно резкого скачка солёности и температуры воды. В межень, при нагонном ветре, приливах или при фоновом повышении уровня моря границы фронтальной зоны смещаются в сторону морского края дельты. При этом на приглубом взморье морские воды на межукавных участках морского края дельты могут подходить непосредственно к берегу. На отмелем взморье опресненные воды как в половодье, так и в межень могут занимать слой воды от поверхности до дна.

Миграция области максимальных горизонтальных градиентов солёности (гидрофронта) в пределах устьевого взморья зависит, во-первых, от различия в расходах воды в межень и половодье, а во-вторых, от морфологии взморья. На открытом приглубом взморье смещение гидрофронта в течение года может составить несколько сотен метров (устье Кубани) или не-

сколько километров (устье Дуная). На отмелем полузакрытом взморье эта миграция значительно больше — до 300 км в Обской губе.

Соленость воды в пределах фронтальной зоны на открытом устьевом взморье возрастает в сторону моря по закону, близкому к экспоненциальному.

Расход воды в речной струе по мере ее распространения в сторону моря увеличивается вследствие подсоса (вовлечения) морских вод. Если принять гипотезу о постоянстве количества движения на участке возрастания расхода воды ($Q_0 v_0 = Q_x v_x$), то можно получить

$$Q_x = Q_0 \frac{v_0}{v_x} = Q_0 \exp \left(k \frac{x}{h_0} \right), \quad (3.1)$$

где изменение средней скорости течения вдоль речной струи принято согласно (2.33).

Одновременно с увеличением расхода будет возрастать и соленость воды, что можно представить в виде уравнения

$$S_x = S_m - (S_m - S_p) \exp \left(-k \frac{x}{h_0} \right), \quad (3.2)$$

где S_p , S_m и S_x — соленость речной, морской воды и соленость воды на расстоянии x от устьевого створа (гребня устьевого бара).

Если соленостью речной воды можно пренебречь, то уравнение (3.2) упрощается:

$$S_x = S_m \left(1 - \exp k \frac{x}{h_0} \right). \quad (3.3)$$

Сравнение формул (3.3) и (2.33) показывает, что изменение вдоль речной струи солености воды должно происходить «зеркально» относительно изменения скорости течения. Недавние исследования выявили, что гипотеза о постоянстве количества движения $Q_0 v_0 = Q_x v_x$ выполняется в речной струе на приглубом взморье с некоторой поправкой: $Q_x / Q_0 = (v_0 / v_x)^m$, где $m \approx 0,6$. Тогда в уравнениях (3.1)—(3.3) выражение под экспонентой должно быть умножено на 0,6.

3.2. Проникновение осолоненных вод на устьевой участок реки и в эстуарий

Зона смешения речных и морских вод может при некоторых условиях (пониженном речном стоке, приливах, нагонах) распространяться на устьевой участок реки или в глубь эстуария. Это явление называют проникновением (интрузией) осолоненных вод в речное русло или эстуарий.

Проникновение осолоненных вод на устьевой участок часто приводит к отрицательным экологическим последствиям. Нередко этому негативному явлению способствует искусственное углубление устьевого бара или рукава.

Проникновение осолоненных вод на устьевой участок реки или в эстуарий обычно происходит в трех формах, различающихся степенью вертикальной стратификации потока и характером вертикального перемешивания (табл. 7).

Таблица 7

Типы проникновения осолоненных морских вод на устьевые участки рек и в эстуарии

Тип проникновения осолоненных вод	Характер вертикальной стратификации	Характер вертикального перемешивания	Параметр стратификации n	Ri_L	$F_{гp}$
I	слабая	полное (хорошее)	0—0,1	<2	>0,71
II	умеренная	частичное (умеренное)	0,1—1,0	2—20	0,22—0,71
III	сильная	клин осолоненных вод	>1,0	>20	<0,22

Формальным признаком типа проникновения осолоненных вод на устьевой участок реки или в эстуарий является параметр стратификации n :

$$n = \frac{\Delta S}{S_{cp}}, \quad (3.4)$$

где ΔS — разница в солёности воды у дна ($S_{дно}$) и на поверхности потока ($S_{пов}$): $\Delta S = S_{дно} - S_{пов}$; $S_{cp} = (S_{дно} + S_{пов})/2$.

I тип проникновения осолоненных вод (полное перемешивание) характерен для условий малого речного стока и сильного

влияния морских факторов (приливов, нагонов, волнения); результирующий поток направлен в сторону моря на всех глубинах (рис. 23, а).

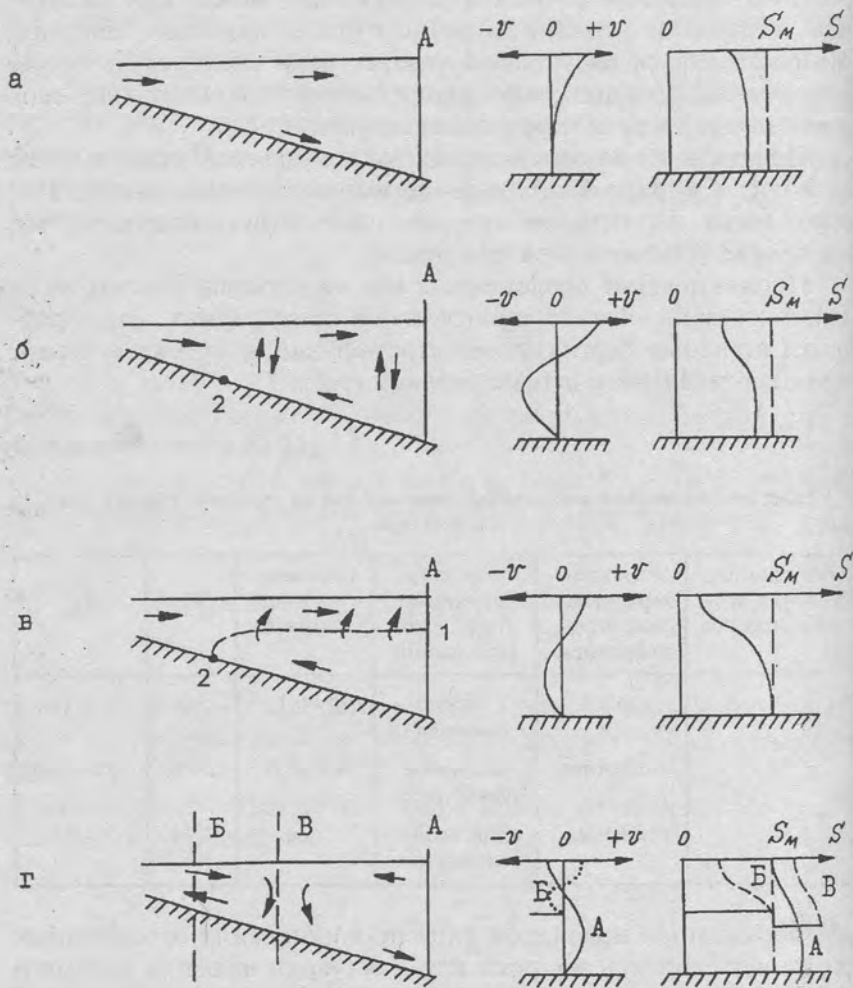


Рис. 23. Схема результирующей циркуляции и вертикального распределения скоростей течения (v) и солёности вод (S) в устьях рек.

«Классические» эстуарии по Д. Притчарду: а — с полным перемешиванием по глубине, б — с частичным перемешиванием, в — с «клином» осолоненных вод (стратифицированные). Вертикальное распределение v и S дано для створа А. «Обратный» эстуарий (г) (створ В расположен в зоне максимальной солёности воды).

1 — линия нулевой скорости течения, 2 — результирующее (среднее) положение «нулевой точки»; S_M — солёность воды в море

Увеличение стока реки и уменьшение воздействия приливов, нагонов и волнения ведут к увеличению вертикальных градиентов солености воды и усилению вертикальной стратификации потока. Поэтому по мере возрастания роли речного стока и уменьшения влияния морских факторов I тип проникновения осолоненных вод переходит во II (частичное перемешивание), а затем в III (клин осолоненных вод) (рис. 23, б и в). Поэтому во многих устьях рек отмечены сезонные изменения типа проникновения осолоненных вод в русло, и, более того, в период повышенного стока это явление может вообще не наблюдаться.

При III типе проникновения осолоненных вод часто наблюдается характерная эстуарная циркуляция: в поверхностном слое опресненный поток направлен в сторону моря, у дна («клизне») осолоненные или соленые воды медленно смещаются в сторону реки (разд. 2.5).

Помимо формального критерия (параметра стратификации n) для определения типа проникновения осолоненных вод в реку используют и «динамические» критерии (см. табл. 7). Среди них «слоевое число Ричардсона»

$$Ri_L = \frac{gh}{v^2} \cdot \frac{\Delta\rho}{\rho_{cp}}, \quad (3.5)$$

где $\Delta\rho = \rho_2 - \rho_1$, $\rho_{cp} = (\rho_2 + \rho_1)/2$, ρ_1 и ρ_2 — плотность воды в верхнем и нижнем слоях (эти плотности часто отвечают плотности речной и морской воды), v — средняя скорость течения в верхнем слое, g — ускорение свободного падения. При $Ri_L > 20$ турбулентность, генерируемая у дна, слаба, граница раздела стабильна. В диапазоне Ri_L от 20 до 2 придонная турбулентность возрастает, перемешивание усиливается. При $Ri_L < 2$ наступает полное вертикальное перемешивание (см. табл. 7). Ri_L обратно квадрату так называемого «плотностного числа Фруда» равного

$$Fr_p = \frac{v}{\sqrt{\frac{\Delta\rho}{\rho_{cp}} gh}}. \quad (3.6)$$

Соответствующие критерияльные величины Fr_p также приведены в табл. 7.

По данным многочисленных исследований [10, 22, 25, 48], дальность проникновения осолоненных вод при любом его типе (I—III) тем больше, чем больше соленость (или плотность) морской воды, глубина русла и меньше расход воды

реки. Поэтому дальность проникновения осолоненных вод испытывает сезонные изменения одновременно с колебаниями стока воды реки, и при некоторых повышенных расходах воды осолоненная вода, находившаяся в речном русле, должна быть вытеснена из него в море. При расходах воды выше некоторого критического осолоненная вода на устьевой участок реки не проникает. Важным результатом исследований является установление факта усиления процесса проникновения осолоненных вод в реку в результате искусственного углубления русла и устьевого бара.

Для описания полного и частичного перемешивания часто используют концепцию адвекции—дисперсии. При одномерном подходе соответствующее уравнение записывают в виде

$$\frac{\partial S}{\partial t} + v \frac{\partial S}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial S}{\partial x} \right), \quad (3.7)$$

где D_x — коэффициент продольной дисперсии; S , v , D_x принимаются осредненными для каждого сечения потока и зависящими от x и t ; ось x в данном случае направлена в сторону реки.

Для простейших стационарных условий (например, при осреднении за приливный цикл) уравнение (3.7) приводится к виду

$$\frac{\partial S}{\partial x} = - \frac{Q_p}{\omega D_x} S, \quad (3.8)$$

где Q_p — речной расход воды, не зависящий от приливов, S , D_x и площадь поперечного сечения русла осреднены за период прилива.

Для простейшего случая $D_x = D_0 = \text{const}$ интегралом уравнения (3.8) будет выражение

$$S_x = S_0 \exp \left(- \frac{Q_p x}{\omega D_0} \right), \quad (3.9)$$

где S_0 и D_0 относятся к начальному (устьевому) створу. Уравнение (3.9) позволяет рассчитывать изменение солёности воды вдоль устьевого участка реки.

Если принять, что дальность проникновения осолоненных вод на устьевой участок реки l_s ограничивается створом, где солёность воды уменьшится до значения солёности речной воды S_p , то для расчета величины l_s получим формулу

$$l_s = \frac{\omega D_0}{Q_p} \ln \left(\frac{S_0}{S_p} \right). \quad (3.10)$$

Коэффициент продольной дисперсии D_0 , по исследованиям Тейлора и Харлемана прямо пропорционален скорости течения и глубине русла и обратно пропорционален коэффициенту Шези [10]. Величина D_0 для разных устьев рек лежит в диапазоне 10—5000 м²/с [22]. Например, величины D_0 составляют для устья Северной Двины 250 м²/с, Яны — 350—1400 (в среднем 940), Темзы — 50—340, Мерси — 136—360, Делавэр — 100—450, Роттердамского водного пути (устье Рейна) 800 м²/с.

Для случая смешения речных и морских вод по типу клина осолоненных вод обычно применяют концепцию плотностной скорости v_p — начальной скорости распространения фронта осолоненной воды в спокойных пресных водах. Полагают, что клин осолоненных вод не может проникать в речное русло, если фактическая скорость течения $v > v_p$ и, что то же самое, если плотностное число Фруда Fr_p (см. формулу 3.6) больше 1. Исходя из этого критическими условиями начала проникновения осолоненных вод в виде клина будут следующие:

$$v_{кр} = v_p = \sqrt{\frac{\Delta\rho}{\rho_{cp}} gh}, \quad (3.11)$$

$$Q_{кр} = Bh^2 \sqrt[3]{\frac{\Delta\rho}{\rho_{cp}} g}. \quad (3.12)$$

Критические расходы воды, при которых начинается проникновение осолоненных вод взморья в рукава дельты, составляют для устья Северной Двины 10 000 м³/с, Миссисипи — около 20 000, Даугавы — 1000 м³/с.

Длина клина осолоненных вод обратно пропорциональна плотностному числу Фруда:

$$\frac{l_s}{h} = a Fr_p^{-b}, \quad (3.13)$$

где параметр a индивидуален для каждого устья, а величина b находится в диапазоне 1,0—2,5 (например, для дельты Яны — 1,17, для дельты Дуная — 2,04). Формула (3.13) наглядно иллюстрирует факт увеличения длины клина с ростом глубины русла, например в результате дноуглубительных работ.

Во многих устьях рек проникновение морских вод в рукава дельты началось после сооружения через мелководные бары судоходных прорезей. Такое явление зафиксировано, например, в устьях Миссисипи (Юго-западный рукав, бар которого углублен для судоходства до 14 м), Дуная (рукава Сулинский и Прорва, бары углублены соответственно до 8 и 5 м), Яны (рукав Главное Русло, бар углублен до 5 м). Примеры проникновения клина осолоненных вод в рукава дельты приведены на рис. 24. Как видно из рисунков, форма клина осолоненных вод в рукавах в устьях рек Яны и Дуная очень схожа — в обоих устьях, несмотря на различные физико-географические условия, рассматриваемый процесс развивается по единой схеме. Предельное распространение осолоненных вод в рукав Главное Русло в устье Яны зимой, когда сток реки фактически прекращается, ограничено мелководными перекатами и составляет около 60 км. Наибольшая зафиксированная дальность распространения осолоненных вод в рукава Прорва и Очаковский в устье Дуная составляет 13 км.

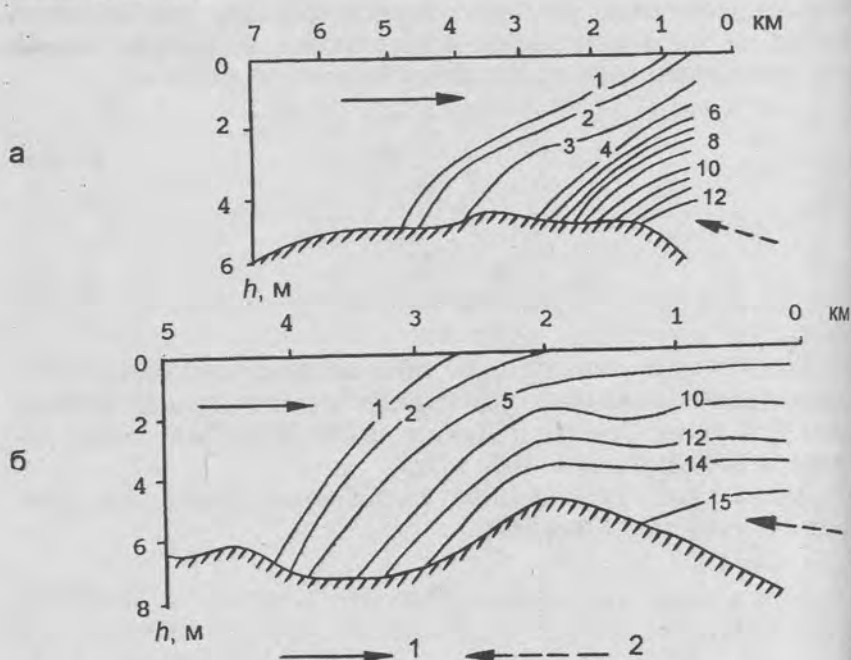


Рис. 24. Клин осолоненных вод в устьях рек:

а — рукав Главное Русло в устье Яны (24 июля 1988 г.), б — рукав Прорва в устье Дуная (14 сентября 1989 г.). Изогалины в ‰. 1 — поток речных, 2 — поток морских вод

Нагоны обычно увеличивают дальность проникновения осолоненных вод в реки, сгоны — уменьшают.

В приливных устьях рек длина клина осолоненных вод испытывает периодические колебания: в прилив она больше, в отлив — меньше.

В устьях Миссисипи и Сенегала осолоненные воды проникают в русло на 240 и 300 км. Величины такого проникновения в другие устья рек приведены в приложении.

Помимо трех хорошо изученных случаев смешения речных и морских вод, существует еще и бесконтактное втекание реки в водоем. Это — еще мало изученный случай так называемого «обратного эстуария», когда речную и морскую воду полностью разделяет зона очень высокой солености, где вода опускается и у дна растекается в обе стороны — к реке и к морю (рис. 23, г). Возникновению зоны высокой солености (гиперсоленой зоны) способствуют резкое уменьшение притока пресной речной воды и сильное испарение в условиях жаркого климата. Явление «обратного эстуария» наблюдается в устьях рек засушливой части Африки (реки Сенегал, Гамбия, Казаманс, Салум) и Австралии.

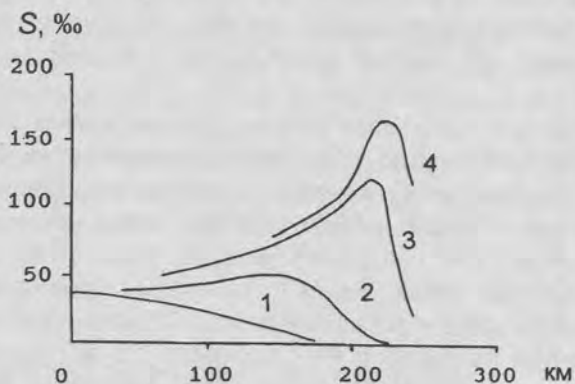


Рис. 25. Распределение солености воды вдоль устьевом участка р. Казаманс (Западная Африка):

1 — июнь 1968 г., 2 — сентябрь 1980, 3 — июль 1985, 4 — июнь 1986 г.

Рисунок 25 иллюстрирует факт постепенного распространения вверх по р. Казаманс в Африке зоны очень высокой солености воды. За шесть лет засухи (с 1980 по 1986 г.) зона высокой солености воды (намного большей солености воды в океане) распространилась в реку более чем на 200 км. По мере распространения этой зоны в реку максимальная соленость в ней возросла сначала до 100, а потом до 150‰.

Глава 4. ДИНАМИКА НАНОСОВ В УСТЬЯХ РЕК

4.1. Основные особенности динамики наносов в устьях рек

Основные особенности динамики наносов в устьях рек обусловлены спецификой устьев рек как природных объектов и спецификой динамики и кинематики вод (гл. 1—3).

Наносы в устьях рек имеют три основных источника: реку (главный источник), приемный водоем, дно и берега водотоков и водоемов в пределах устья. Наносы речного и морского происхождения часто существенно различаются по гранулометрическому и минералогическому составу. В речных наносах в устьях крупных рек обычно преобладают взвешенные частицы мельче 0,05 мм.

На динамику наносов в устьях рек оказывает решающее влияние пространственно-временная изменчивость скоростей течения, в частности: 1) изменение скоростей течения вдоль устьевого участка реки, обусловленное сопряжением реки и моря при различном сочетании расхода воды реки и уровня приемного водоема (разд. 2.4) и вызывающее продольное изменение мутности воды и расхода наносов; 2) реверсивный характер течений при приливах и нагонах (разд. 2.5 и 3.2), предопределяющий также реверсивный характер движения наносов и возможность проникновения в устье реки морских наносов; 3) распределение и перераспределение расходов воды по рукавам дельты (разд. 2.5), обуславливающее аналогичное распределение и перераспределение расходов наносов, правда усложненное эрозионно-аккумулятивными процессами в дельте; 4) гашение скоростей течения вдоль речной струи на взморье (разд. 2.8), приводящее к отложению речных наносов и их сортировке.

При описании динамики наносов в устьях рек важное значение приобретает понятие транспортирующей способности потока $R_{тр}$, под которой понимают тот предельный расход взве-

шенных и влекомых наносов, который поток в состоянии переносить при данных гидравлических условиях:

$$R_{\text{тр}} = Qs_{\text{тр}}, \quad (4.1)$$

где $s_{\text{тр}}$ — мутность воды, соответствующая транспортирующей способности потока. $s_{\text{тр}}$ в свою очередь может быть выражена одной из следующих формул:

$$s_{\text{тр}} = k_1(\rho_s - \rho) \left(\frac{v}{w} \right)^\alpha, \quad (4.2)$$

$$s_{\text{тр}} = k_2(\rho_s - \rho) \left(\frac{v}{\sqrt{gh}} \right)^\alpha, \quad (4.3)$$

где w — гидравлическая крупность частиц наносов, ρ_s и ρ — плотность наносов и воды, k_1 и k_2 — эмпирические безразмерные коэффициенты, α — параметр, обычно равный 3. Иногда вместо (4.2) и (4.3) принимают просто

$$s_{\text{тр}} = kv^\alpha, \quad (4.4)$$

где k — эмпирический размерный коэффициент.

Как видно из уравнений (4.2)–(4.4), изменение мутности воды в пространстве и во времени в устье реки сильно зависит от скорости течения воды.

Условием движения влекомых наносов является соотношение $v > v_{\text{н}}$, где $v_{\text{н}}$ — неразмывающая (критическая) средняя скорость потока, равная, по А. М. Латышенкову,

$$v_{\text{н}} = 5,63^{\frac{1}{6}} D^{\frac{1}{3}}, \quad (4.5)$$

где D — средний диаметр влекомых наносов.

На долю влекомых наносов в устьях рек обычно приходится от 1 до 10% стока взвешенных наносов. Относительное содержание крупных фракций наносов в половодье увеличивается, в межень уменьшается.

Между расходами взвешенных ($R_{\text{взв}}$) и влекомых ($R_{\text{вл}}$) наносов в устьях рек имеются связи вида

$$R_{\text{взв}} = a_1 Q^n, \quad (4.6)$$

$$R_{\text{вл}} = a_2 Q^m, \quad (4.7)$$

$$\frac{R_{\text{вл}}}{R_{\text{взв}}} = \frac{a_2}{a_1} Q^{m-n}, \quad (4.8)$$

где a — эмпирические коэффициенты, индивидуальные для каждого водотока; показатели степени n и m равны приблизительно: $n \approx 2...3$, $m \approx 4...5$. Из формул (4.6)—(4.8) следует, что при возрастании расхода воды расход влекомых наносов растет быстрее, чем расход взвешенных наносов.

4.2. Движение наносов на устьевом участке реки и в эстуарии

Изменение мутности воды вдоль устьевого участка реки определяется продольным изменением скоростей течения. В значительное половодье, когда на устьевом участке наблюдается гидравлический спад и скорости течения возрастают вдоль русла (разд. 2.3), увеличение транспортирующей способности потока приводит к размыву отложений и увеличению мутности вдоль течения. В межень, наоборот, в условиях гидравлического подпора и уменьшения скоростей течения вдоль русла, транспортирующая способность потока также уменьшается в этом направлении, наносы отлагаются и мутность уменьшается. Влекомые же наносы могут вообще прекратить свое движение при малых расходах воды, когда поток на устьевом участке оказывается в состоянии сильного подпора со стороны моря.

Изменение мутности воды вдоль устьевого участка реки может быть приближенно описано уравнением

$$s = (s_0 - s_{\text{тр}}) \exp \left(-k \frac{wB}{Q} x \right) + s_{\text{тр}}, \quad (4.9)$$

где s_0 — мутность воды в начальном (верхнем) створе, $s_{\text{тр}}$ — мутность, соответствующая транспортирующей способности потока, определяемая по формулам вида (4.2)—(4.4), w — гидравлическая крупность частиц. Если $s > s_{\text{тр}}$, то мутность воды вдоль потока уменьшается и наносы отлагаются. Если $s < s_{\text{тр}}$ и дно размываемо, то происходит размыв русла и мутность воды вдоль потока увеличивается.

Важная роль в динамике наносов в устьях рек, особенно приливных, принадлежит эстуарной циркуляции (разд. 2.5 и 3.2). Результирующее движение воды в сторону реки у дна, большие скорости приливных течений и повышенная вследствие этого турбулентность становятся причиной возникновения в районе «нулевой точки» в устьях рек с большими приливами зоны (участка) с большой мутностью воды, называемой «макси-

мумом мутности», «илистыми пробками». Содержание взвешенных наносов в этой зоне значительно больше, чем в речной или тем более морской воде. В устье Жиронды мутность воды во время прилива достигает 10 кг/м^3 . Зона с повышенной мутностью у дна смещается вдоль русла в течение приливного цикла и при сезонных колебаниях стока.

При хорошо выраженных приливных течениях и эстуарной циркуляции вверх по устьевому участку реки могут распространяться и наносы морского происхождения.

В связи с формированием зоны повышенной мутности в приливных устьях рек возрастает заносимость судоходных каналов, доков, портовых акваторий, расположенных в этих районах. Заносимости каналов способствует и задержка в движении речных влекомых наносов, которые отлагаются в районе «нулевой точки» (см. рис. 14).

Долгое время считалось, что в процессе отложения наносов в устьях рек главная роль принадлежит флокуляции и коагуляции, т. е. образованию хлопьев из частиц наносов и их выпадению в осадок. При этом в качестве основных причин этих явлений признавалось взаимопритяжение частиц наносов в солоноватой воде. В последнее время стали считать, что в процессах флокуляции более важную роль играют органические вещества и живые организмы. В процессе же отложения наносов важное значение имеет гидравлическая крупность частиц, которая возрастает с увеличением мутности воды (особенно на участке «максимума мутности»), а также по мере замены в хлопьях наносов пресной воды солоноватой.

Расходы взвешенных наносов распределяются в узлах разветвления дельтовых рукавов приблизительно пропорционально расходам воды, что объясняется приблизительным равенством мутности воды в истоках смежных рукавов. Если же створы измерений находятся в рукавах вдали от их истоков, то характер соотношения между R и Q в рукавах может измениться. Как правило, в отмирающих рукавах доля стока взвешенных наносов по сравнению с долей стока воды уменьшается, в размывающихся рукавах — увеличивается.

Расходы влекомых наносов могут распределяться по рукавам дельты не пропорционально расходам воды. Здесь большая роль принадлежит соотношению скоростей течения в смежных рукавах: большая часть влекомых наносов поступает в более глубокие рукава с невысоким порогом в их истоках и в рукава с большими скоростями течения.

4.3. Движение наносов на открытом устьевом взморье

Вдоль речной струи на открытом устьевом взморье вследствие разбавления речной воды морской мутность уменьшается согласно следующему уравнению, противоположному по смыслу уравнению для солености воды (3.2):

$$s_x = (s_0 - s_m) \exp\left(-k \frac{x}{h_0}\right) + s_m, \quad (4.10)$$

где s_0 — мутность воды в начальном (устьевом створе), s_m — мутность морской воды, k — коэффициент в формулах (2.33) или (3.1).

Если мутностью морской воды можно пренебречь, то выражение (4.10) упрощается:

$$s_x = s_0 \exp\left(-k \frac{x}{h_0}\right). \quad (4.11)$$

Уменьшение мутности воды вдоль струи по экспоненте, согласно уравнениям (4.10) или (4.11), еще не свидетельствует об отложении наносов. Этот процесс может быть оценен лишь с учетом транспортирующей способности потока. Объединяя уравнения (2.33) и (4.2) при $\alpha = 3$ и не учитывая мутности морской воды s_m , получим

$$s_x = s_0 \exp\left(-3k \frac{x}{h_0}\right). \quad (4.12)$$

В реальных условиях в речной струе на устьевом взморье происходят оба процесса, влияющие на продольное изменение мутности воды: разбавление речных вод морскими и осаждение наносов вследствие резкого уменьшения транспортирующей способности потока.

Движение морских наносов на взморье под действием волнения может быть описано формулой П. Комара и Д. Инмана

$$R_b = kE \sin \alpha \cos \alpha, \quad (4.13)$$

где R_b — вес песчаных наносов в воде, переносимых волнением через единицу ширины поперечного сечения прибрежной полосы в единицу времени, α — угол подхода волн к берегу, E — удельный поток энергии ветрового волнения, равный

$$E = \frac{1}{8} \rho g h_b^2 c_{гр}, \quad (4.14)$$

где h_b — высота волн, $c_{гр}$ — групповая скорость волн. Для того чтобы формула (4.13) давала расход наносов в единицах массы, в нее необходимо внести множитель $(\rho_s - \rho)/\rho g$. Наибольший вклад во вдольбереговую поток наносов дают волны средней высоты за период шторма.

4.4. Баланс наносов в устьях рек

Уравнения баланса наносов всех фракций и только крупных (барообразующих) фракций в устьях рек можно записать для интервала времени Δt соответственно в виде

$$\pm \Delta W_{кв} = W_p \pm W_b - W_r, \quad (4.15)$$

$$\pm \Delta W'_{кв} = W'_p \pm W_b, \quad (4.16)$$

где $\pm \Delta W_{кв}$ — изменение объема устьевого конуса выноса, $\pm \Delta W'_{кв}$ — изменение части объема устьевого конуса выноса, сложенной крупными наносами, W_p — полный сток наносов реки, W'_p — сток наносов лишь крупных фракций, W_b — поступление (+) или унос (–) крупных баро- и пляжеобразующих наносов с вдольбереговым потоком под воздействием волнения, W_r — объем наносов (в основном мелких), уносимых за пределы устьевого конуса выноса течениями.

Главную роль в балансе в устьях рек играют члены W_p и W'_p . Величина W_b обычно невелика и имеет знак минус. Величину W_r непосредственно оценить бывает трудно, ее часто определяют как остаточный член уравнения баланса наносов.

В устьях рек (на полузакрытом взморье типа лагун, лиманов, эстуариев, на поверхности и в водоемах дельты, на дне устьевого конуса выноса) обычно задерживается 50–70% всех речных наносов. В ряде случаев эта величина достигает 90–95% [25]. Доля задерживающихся в устьевой области речных наносов возрастает с увеличением размера полузакрытого взморья, объема самого конуса выноса и площади дельты. Поэтому доля остающихся в теле конуса выноса наносов обычно увеличивает-

ся с ростом «возраста» дельты. Данные о балансе наносов в устьях некоторых рек приведены в табл. 8. Эти данные свидетельствуют о том, что чем крупнее дельта и конус выноса и чем слабее разрушающее воздействие волнения, тем больше речных наносов остается в устье реки.

Т а б л и ц а 8

Составляющие баланса наносов в устьях рек и морфометрические характеристики дельт

Дельта	Длина дельты L_d , км ²	Площадь дельты F_d , км ²	Объем конуса $W_{кв}$, км ³	Составляющие баланса наносов в % от стока наносов реки W_p		
				$\Delta W_{кв}$	W_v	W_r
Терека (новая)	1,4	3,2	0,015	33,2	-5,3	-61,5
Сулака (старая)	13,0	67	1,29	35,7	-64,3*	
Дуная (Килийская)	19,3	348	8,26	98,8	-1,5	-0,3
Риони	2,2	8,4	0,096	30,6	-6,7	-62,7
Куры	10,0	194	3,2	47,7	-52,3*	
Амударьи	19,0	167	1,0	84	-16*	
Миссисипи	80,0	600	308	94	-6*	
Хуанхэ	—	100	—	67	-33*	

* Суммарная величина W_v и W_r .

Дельты и устьевые конусы выноса в большинстве случаев являются не ловушками для морских наносов, как иногда считают, а, наоборот, источником пополнения вдольберегового потока наносов. «Мысовой» («бунный») эффект, т. е. задержка части наносов, переносимых вдольбереговым потоком, свойствен лишь небольшим выдвинутым в море дельтам и лишь на ранних этапах их развития. Таким образом, в дельтах выдвижения волнение играет в основном не созидающую, а разрушающую роль.

Глава 5. МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ (ЭРОЗИОННО-АККУМУЛЯТИВНЫЕ) ПРОЦЕССЫ В УСТЬЯХ РЕК

5.1. Основные особенности морфологических процессов в устьях рек

Направленность и интенсивность эрозионно-аккумулятивных процессов в устьях рек, как и в других водных объектах, в основном зависят от того, в какую сторону и насколько фактический расход наносов R отличается от транспортирующей способности потока $R_{тр}$ или (в случае $Q = \text{const}$) насколько фактическая мутность воды s отличается от мутности $s_{тр}$, отвечающей транспортирующей способности потока. Для определения $s_{тр}$ и $R_{тр}$ пользуются уравнениями (4.2)—(4.3) и (4.1) (разд. 4.1).

Если фактический расход наносов R равен транспортирующей способности потока $R_{тр}$ (или $s = s_{тр}$), то все наносы, поступающие на данный участок устья, проходят его транзитом без направленных эрозионно-аккумулятивных процессов (русло динамически устойчиво и возможны лишь обратимые знакопеременные русловые деформации). Если $R > R_{тр}$ (или $s > s_{тр}$), то происходит отложение наносов; в случае $R < R_{тр}$ (или $s < s_{тр}$) — размыв дна (если, конечно, оно размываемо). В двух последних случаях в результате отложения наносов или размыва R постепенно изменяется, приближаясь к $R_{тр}$, и эрозионно-аккумулятивные процессы затухают.

Как отложение наносов, так и размыв могут быть описаны с помощью уравнения баланса наносов (уравнения русловых деформаций), которое в дифференциальной форме обычно записывают в виде

$$\frac{\partial R}{\partial x} + \rho_{отл} B \frac{\partial z}{\partial t} = 0, \quad (5.1)$$

где z — отметка дна, B — ширина русла, $\rho_{отл}$ — плотность донных отложений, зависящая от их фракционного состава и равная для устьев рек 1000—1200 кг/м³.

При $R > R_{\text{кр}}$ расход наносов вдоль потока уменьшается ($\partial R / \partial x < 0$), отметки дна в результате отложения наносов повышаются ($\partial z / \partial t > 0$); при $R < R_{\text{кр}}$ расход наносов вдоль потока увеличивается ($\partial R / \partial x > 0$), отметки дна в результате размыва понижаются ($\partial z / \partial t < 0$).

Основной физической первопричиной крупномасштабных морфологических процессов в устьях рек и процессов дельтообразования является отложение речных наносов при впадении потока в водоем. Гашение скоростей течения в речной струе в приемном водоеме согласно выражениям (2.12) или (2.33) ведет к уменьшению транспортирующей способности потока, согласно уравнению (4.12) и отложению наносов. В первую очередь отлагаются крупные влекомые наносы, так как скорости течения в струе становятся меньше неразмывающих скоростей согласно уравнению (4.5). Ближе к устьевому створу отлагаются более крупные наносы, дальше — более мелкие, что ведет к естественной сортировке отложений. Отложенные наносы образуют баровую отмель, а затем устьевой бар и устьевой конус выноса в целом. На некотором этапе этого процесса начинается формирование и надводной дельты.

Формирование устьевого конуса выноса в устье реки и выдвигание дельты в приемный водоем, связанные с упомянутым отложением наносов, могут быть описаны с помощью интегральных балансовых уравнений вида (4.15)—(4.16).

5.2. Процессы дельтообразования

Развитию дельт способствуют большой сток наносов реки, мелководность устьевого взморья, слабое воздействие приливов и морского волнения.

При относительно стабильном стоке наносов процесс дельтообразования определяется прежде всего размерами и формой устьевого взморья. В случае полузакрытого взморья (узкий залив, губа, лиман, лагуна, эстуарий) емкость его относительно невелика и формирование дельты идет быстрее, чем на открытом устьевом взморье. Кроме того, в этом случае заметно слабее разрушающее воздействие на дельту морского волнения.

На емкость взморья существенное влияние оказывает положение уровня приемного водоема. С изменением уровня океана (моря, озера) перемещается (плавно или скачкообразно) и место отложения речных наносов и формирования дельты. При значительном повышении уровня моря (трансгрессия) происходит затопление всей старой дельты или ее части, а затем и до-

лины реки и части приморской равнины; место наиболее активной аккумуляции наносов смещается в сторону реки.

В месте контакта склона приморской равнины с поднимающимся уровнем моря, т. е. в районе уреза воды, при уклонах дна в диапазоне 0,1—1‰ обычно под воздействием волнения формируются песчаные береговые бары. При продолжении повышения уровня моря эти бары наращиваются в высоту и смещаются в сторону суши. Часто береговые бары блокируют прибрежную акваторию или затопленную речную долину. В результате возникает лагуна или лиман, отгороженные от моря блокирующей косой.

При значительном снижении уровня моря (регрессия) часть дельты и дна устьевого взморья сохнет и обнажается, место отложения наносов смещается в сторону водоема. Поэтому в процессах дельтообразования на побережьях океанов, внутренних морей и крупных озер с изменяющимся уровнем обычно хорошо прослеживаются эпохи трансгрессий и регрессий.

При относительной стабилизации уровня приемного водоема в завершающей фазе трансгрессии развитие новых дельт происходит обычно стадийно с изменением типа устьевой области (рис. 26, см. также разд. 1.2).

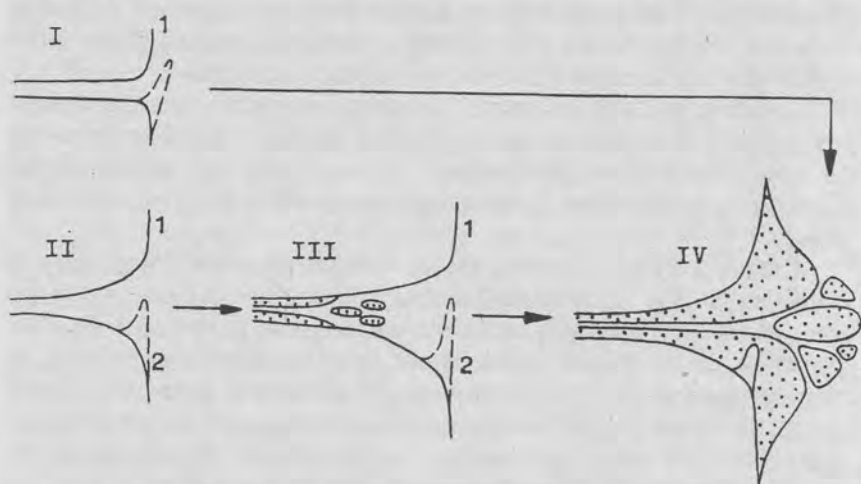


Рис. 26. Схема эволюции устьевых областей рек и дельтообразования при стабильном уровне приемного водоема.

Устьевые области: I — простая, II — эстуарная, III — эстуарно-дельтовая (с дельтой выполнения), IV — дельтовая (с дельтой выдвигания). 1 — берег без блокирующей косы, 2 — с блокирующей косой

Стадия формирования дельты выполнения проявляется в постепенном заполнении речными наносами узкого залива, лагуны, лимана, губы, эстуария. По истечении некоторого времени (что зависит прежде всего от величины стока наносов) полузакрытое устьевое взморье заполняется наносами и наступает стадия формирования дельты выдвигания на открытом морском побережье.

Каждая из двух упомянутых стадий развития дельты включает по три фазы: малорукавной, многорукавной и вновь малорукавной дельты. Малорукавность в начале стадии дельты выполнения объясняется ограниченностью пространства берегами залива, а в конце этой стадии тем, что река прорывает линию береговых баров или блокирующую залив косу обычно лишь в одном-двух местах. Малорукавность в начале стадии дельты выдвигания объясняется небольшим размером новой дельты. Максимальное количество рукавов формируется в середине обеих стадий. При значительном выдвигании дельты в море количество рукавов вновь уменьшается в связи с волновой блокировкой малых водотоков.

Процессы развития дельт могут проходить эволюционно (медленно) или скачкообразно (быстро). Эволюционное развитие проявляется в одновременном или последовательном выдвигании отдельных рукавов в море (дельты Кубани, Лены, Роны и др.). Скачкообразный характер развития дельт с прорывами свойствен рекам с большой мутностью воды (обычно более 1 кг/м^3) и быстрым выдвиганием дельты в море.

Скачкообразное развитие дельт проявляется в виде повторяющихся циклов формирования причлененных (образующихся на морском крае существующей дельты) или наложенных (образующихся на поверхности существующей дельты) частных дельт.

Каждый цикл формирования новой причлененной дельты включает в себя несколько этапов: прорыв русла по новому направлению к морю, образование первичной береговой отмели, формирование новой надводной причлененной дельты и ее гидрографической сети, отмирание этой сети и волновое разрушение (абразия) дельты или ее части после нового прорыва и переключения стока по новому направлению. Приведем некоторые примеры формирования причлененных дельт.

В устье Дуная в разные периоды развития современной дельты формировались по крайней мере четыре причлененные частные дельты [11, 24, 26]. Сначала — причлененная частная дельта древнего Георгиевского рукава, затем — причлененная частная дельта Сулинского рукава, затем — новая при-

члененная дельта в устье Георгиевского рукава. В последние 200—300 лет сформировалась четвертая причлененная частная дельта Килийского рукава. Вторая из трех упомянутых причлененных дельт после того, как большая часть стока реки вновь стала поступать в Георгиевский рукав, строивший новую причлененную дельту, была полностью разрушена морским волнением. Из продуктов абразии этой дельты сформировалась песчаная коса Сэрэтуриле севернее дельты Георгиевского рукава.

Анализ всего сохранившегося картографического материала [6, 19] позволил по-новому осветить историю развития дельты Сулака (рис. 27). В устье этой реки начиная с конца XVIII в. последовательно сформировались: пионерная дельта выдвигения и три причлененные частные дельты. Началом образования первой причлененной дельты приблизительно в 1922 г. послужил естественный прорыв Сулака через левую устьевую косу; вторая и третья причлененные дельты начали формироваться после прорыва Сулака по искусственному прокопу на север (1929 г.) и после вывода реки по искусственной прорези на восток (1957 г.). Если бы не прокоп 1929 г., то естественный прорыв реки осуществился бы, по-видимому, в восточном направлении, на участке наибольшего разрушения морского края дельты волнением.

В современной дельте Миссисипи в разное время сформировалось несколько причлененных частных дельт [15, 46]. Однако все они, в отличие от дельт Дуная и Сулака, не получили развития, и их гидрографическая сеть отмерла. По-видимому, причиной их отмирания явилось слишком быстрое выдвигение на мелководные участки устьевого взморья новых водотоков, образовавшихся в результате прорыва прирусловых валов основного русла реки. В устье Миссисипи последовательно в результате прорывов образовались «субдельты» Драй-Сипрес, Гренд-Лярд, Уэст-Бей (1838 г.), Кьюбитс-Гэп (1862 г.), Бэптис-Коллет (1874 г.) и Гарден-Айленд-Бей (1891 г.). Максимальная доля стока наносов Миссисипи, отвлекаемая в эти дельты, составляет около 20%. Начиная с 30—50-х гг. нашего столетия гидрографическая сеть четырех последних частных дельт начала отмирать (у первых двух отмерла значительно раньше).

Каждый полный цикл формирования наложенной дельты включает в себя следующие этапы: прорыв русла по новому направлению в пониженную часть старой дельты, образование разливов и озер на поверхности старой дельты, заполнение понижений рельефа наносами, формирование многорукавной русловой сети новой наложенной дельты, сосредоточение стока в

ограниченном числе водотоков этой дельты, отмирание гидрографической сети наложенной дельты после прорыва русла по новому направлению. Нередко наложенная частная дельта достигает морского края старой дельты, и процесс переходит в формирование причлененной дельты, как, например, в устьях Терека, Или, Амударьи, Хуанхэ.

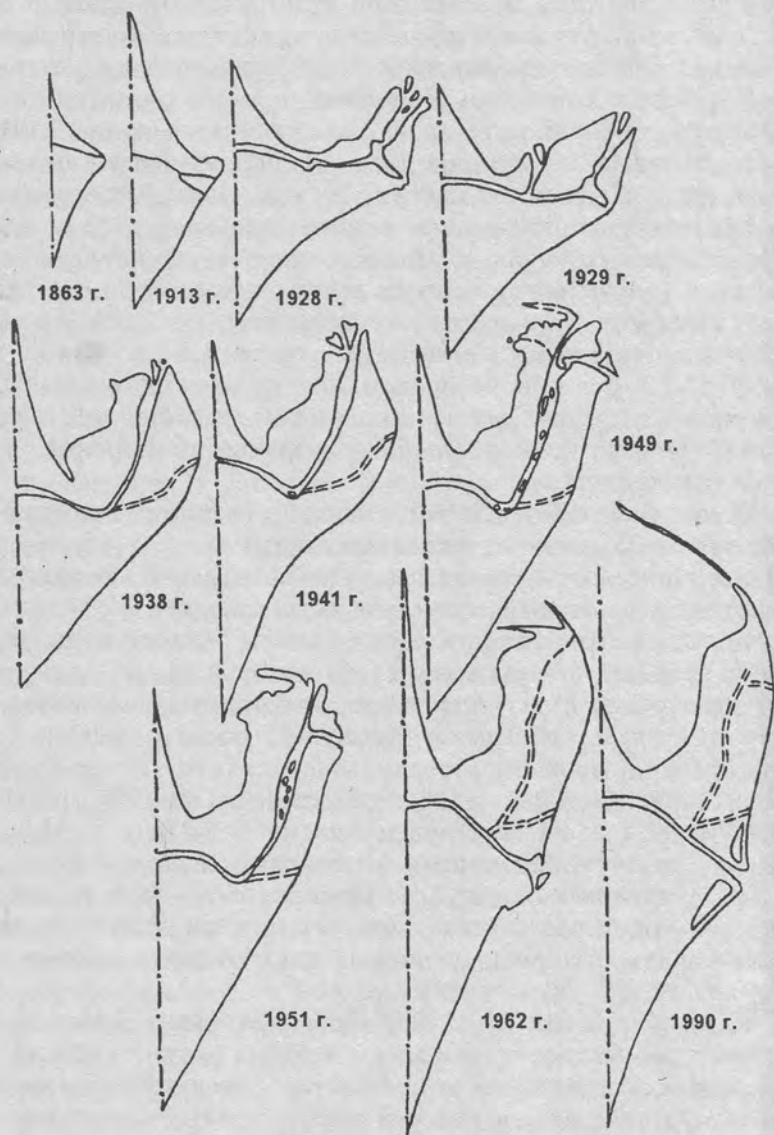


Рис. 27. Схема эволюции дельты Сулака в XIX и XX вв.

В дельте Терека за последние 500 лет сформировалось семь наложенных частных дельт [6, 7, 19]. Магистральными рукавами этих частных дельт были: Куру-Терек (XVI в.), Сулу-Чубутла (XVII в.), Старый Терек (с начала XVIII в.), Новый Терек (с конца XVIII в.), Бороздинский прорыв (с начала XIX в.), Таловка (с середины XIX в.), Каргалинский прорыв (с 1914 г.). Переход от одного положения магистрального рукава к другому происходил в результате прорыва и сопровождался полной перестройкой гидрографической сети дельты с образованием новой системы водотоков и отмиранием старой. Гидрографическая сеть каждой наложенной дельты существовала в среднем около 70 лет. Наиболее изучен последний (незавершенный) цикл развития наложенно-причлененной дельты — образование и развитие Каргалинского прорыва. После прорыва Терека в половодье 1914 г. в пониженной южной части дельты образовались внутридельтовые разливы (1914—1939 гг.). На следующем этапе (1940—1962 гг.) на месте озер и разливов сформировалась многорукавная дельтовая русловая система, в Аграханском заливе начала формироваться причлененная дельта выполнения. В последующие 1963—1973 гг. на устьевом участке Терека происходило формирование практически однорукавного русла. Искусственный вывод Терека на побережье Каспия в 1973 г. и окончательно в 1977 г. привел к началу формирования новой причлененной дельты на открытом морском побережье.

В дельте Или за последние 600 лет произошли четырехкратные изменения направления стока и последовательно сформировались четыре наложенные частные дельты. Каждый цикл здесь продолжался около 200 лет: после прорыва, образования разливов и формирования русловой сети новой наложенной дельты с последующим сосредоточением стока в однорукавном русле (около 70 лет) наступал этап старения нового русла, сопровождающийся его интенсивным меандрированием (40—60 лет). После нового прорыва начинался этап отмирания старой гидрографической сети (около 70 лет).

Известны многократные перестройки гидрографической сети дельты Амударьи [24, 28, 30] с образованием наложенных и наложенно-причлененных частных дельт.

В процессе развития причлененных дельт выдвижения часто образуются последовательные серии дельтовых лопастей, а затем пояса частных дельт.

5.3. Динамика русловой сети дельты

Новые транзитные водотоки дельт, связанные непосредственно или через системы других водотоков с самой рекой, образуются в дельтах в основном двумя путями: делением русла на устьевом баре (баровый тип образования водотоков) и при прорывах (прорывной тип образования водотоков).

Дельтовые водотоки, как правило, проходят в своем развитии следующие стадии: 1) зарождения и становления; 2) активного развития (активизации); 3) зрелости (динамического равновесия); 4) старения и отмирания.

Основной предпосылкой активизации водотока является увеличение его расхода воды, отмирания водотока, наоборот, — уменьшение его расхода воды. Поэтому динамика русловой сети дельты неразрывно связана с процессом перераспределения стока воды по рукавам (разд. 2.5); при этом изменение распределения стока воды по рукавам и изменение поперечных размеров русла в процессе их размыва или заиления обычно стимулируют друг друга. Например, увеличение ширины и глубины русла в результате размыва уменьшает гидравлические сопротивления рукава, что вызывает увеличение поступающего в рукав расхода воды. Увеличение стока стимулирует размыв русла и т. д. В смежном рукаве при этом происходят взаимосвязанные процессы уменьшения расхода воды и заиления русла. По этим причинам активизация и, наоборот, отмирание смежных рукавов — процесс прогрессирующий, ведущий к сосредоточению стока в ограниченном числе наиболее крупных рукавов и отмиранию мелководных боковых водотоков. Многорукавные русловые дельтовые системы поэтому оказываются весьма неустойчивыми и недолговечными. Описанный процесс усложняется непропорциональным устьевым удлинением дельтовых водотоков. Удлинение водотока влечет за собой (при прочих равных условиях) уменьшение его стока. Поскольку крупные размывающиеся рукава удлиняются наиболее сильно, иногда возможно конкурирующее развитие смежных рукавов: удлиняющийся рукав уменьшает свой расход, а смежный с ним рукав, наоборот, увеличивает и начинает выдвигаться более интенсивно. На каком-то этапе своего развития он может потерять активность, и сток перераспределится вновь в первый рукав и т. д.

5.4. Русловые процессы в устьях рек

Основная особенность русловых процессов в устьях рек — преобладание необратимых (однонаправленных) русловых деформаций над обратимыми (знакопеременными).

Главные причины необратимых русловых деформаций в устьях рек: 1) устьевое удлинение при отложении речных наносов на устьевом взморье, формировании устьевого конуса выноса и выдвигании русел водотоков в приемный водоем; 2) изменение фонового уровня приемного водоема; 3) перераспределение стока по водотокам дельты, ведущее к размыву одних и заилению и отмиранию других водотоков (разд. 5.3).

При стабильном уровне приемного водоема и достаточном стоке речных наносов в устье реки происходит весьма специфический процесс, названный *устьевым удлинением*. Выдвижение дельты в море сопровождается смещением в сторону приемного водоема трех зон разнородных русловых деформаций: аккумуляции наносов на протяжении всего предбарового участка русла, эрозии на речном склоне устьевого бара и аккумуляции наносов на морском склоне устьевого бара (рис. 28, а). Наиболее яркий пример активного устьевого удлинения приведен в работе [28]: за период 1940—1951 гг. рукав Инженер-узек в дельте Амударьи выдвинулся на 25 км, создав новую дельту площадью 200 км². Это выдвижение привело к повышению уровня воды и берегов русла в районе бывшего морского края дельты на 3,5—4,0 м. Уклоны водной поверхности на месте бывшего взморья возросли с 0 до $15 \cdot 10^{-5}$. Подъем уровня вследствие устьевого удлинения распространился на 50—60 км.

Интересный случай частично естественного, частично искусственного устьевого удлинения произошел в Сулинском рукаве дельты Дуная. За 100 лет в устье рукава были сооружены выдвинутые вдоль русла в море искусственные дамбы длиной около 7 км. Это привело к повышению уровня в месте бывшего морского края в среднем на 0,3 м, что хорошо отвечает формуле $\Delta H = \Delta LI$, где I — уклон водной поверхности (около $4,5 \cdot 10^{-5}$ в данном случае).

Хорошей иллюстрацией устьевого удлинения реки при относительно стабильном уровне моря является выдвижение в море Очаковского рукава дельты Дуная (рис. 29). Например, за период 1930—1957 гг. этот рукав выдвинулся в Черное море на 10 км. Это (при средних уклонах водной поверхности в рукаве около $2,5 \cdot 10^{-5}$) должно было привести к повышению уровня воды в истоке рукава (Вилково) приблизительно на 25 см.

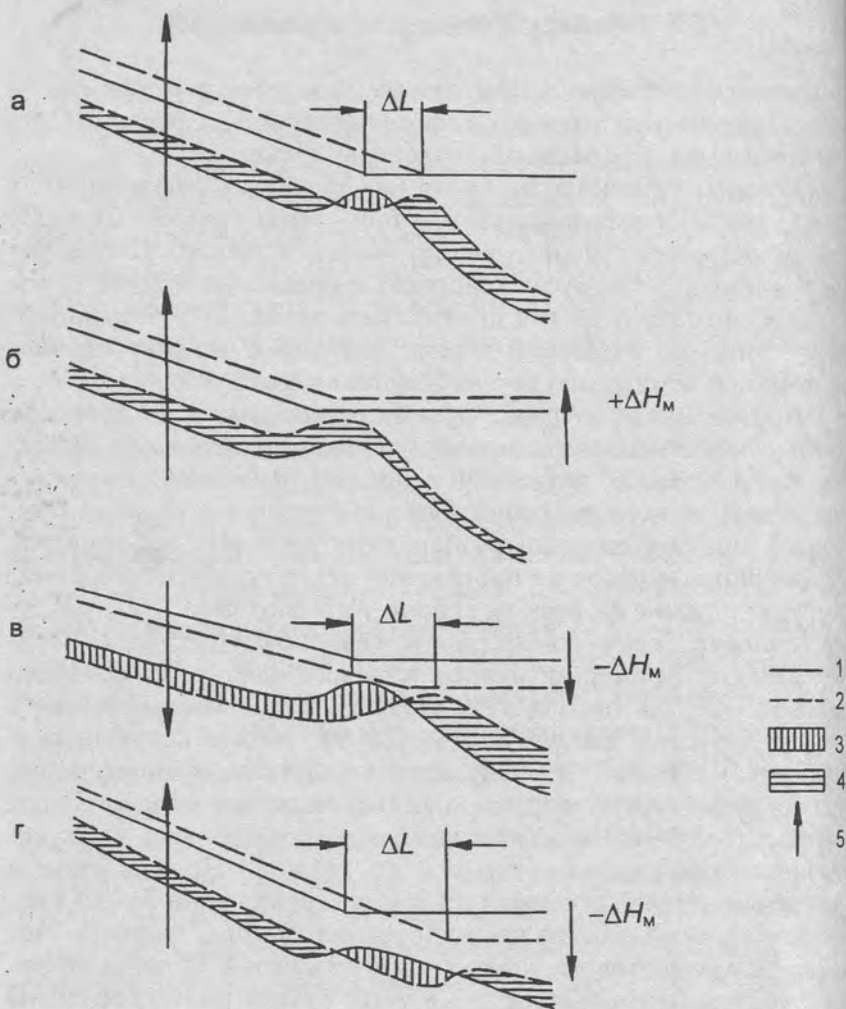


Рис. 28. Схема необратимых русловых деформаций на устьевом участке реки в результате: устьевого удлинения при стабильном уровне моря (а), повышения уровня моря (б), понижения уровня моря в случае приглубого взморья (в), понижения уровня моря в случае отмелого взморья (г); по [25]. 1 и 2 — начальное и конечное положение урвневной поверхности и дна, 3 — размыв, 4 — аккумуляция наносов, 5 — направленность изменения уровня воды и отметок дна, ΔL — величина устьевого удлинения русла

Изменение фонового (среднего) уровня приемного водоема (моря), как базиса эрозии реки, ведет к крупномасштабным эрозионно-аккумулятивным процессам на устьевом участке реки. Повышение уровня моря всегда влечет за собой аккумуля-

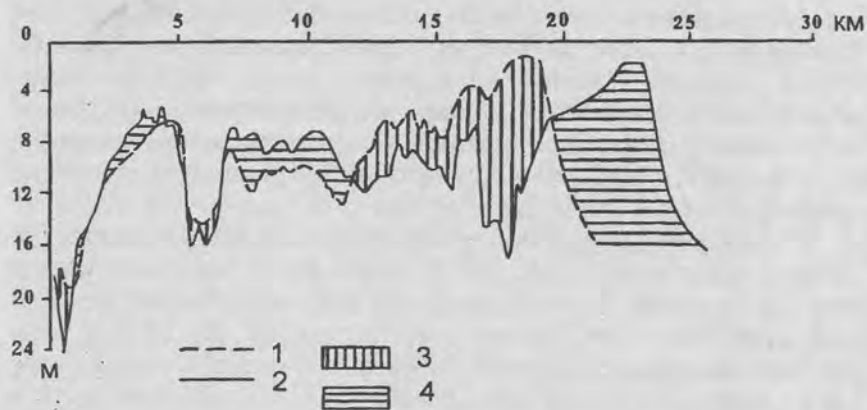


Рис. 29. Схема выдвигания в Черное море Очаковского рукава в дельте Дуная: 1 — 1894 г.; 2 — 1954 г.; 3 — эрозия; 4 — аккумуляция наносов

ляцию наносов и повышение дна русла (см. рис. 28, б). Повышение уровня Каспийского моря на 2,4 м в 1978—1995 гг. привело к быстрому распространению подпора в руслах рек Урала, Терека, Сулака и Куры. Кривые $Q=f(H)$ в устьях этих рек стали повышаться (см. рис. 10, б). Одновременно с ростом уровня воды благодаря аккумуляции наносов стали повышаться и отметки дна. После затопления обширной отмелой зоны устьевое взморье Волги подпор начал распространяться и в дельту этой реки. Повышение уровня Каспийского моря привело также к затоплению приморских частей некоторых дельт и к волновому разрушению их морского края.

Понижение уровня моря в случае приглубого взморья (см. рис. 28, в) вызывает эрозию на устьевом участке. Аккумуляция продуктов этой эрозии и транзитных наносов на морском склоне устьевых баров приводит к устьевому удлинению, которое может частично или даже полностью компенсировать эрозию на вышележащем участке. Падение уровня Каспийского моря на 2,28 м в период с 1933 по 1956 г. сопровождалось снижением уровня воды Сулака у пос. Сулак (недалеко от моря) на 1,35 м. Этот процесс четко зафиксирован по систематическому понижению кривых $Q=f(H)$ (см. рис. 10, б). Приблизительно на столько же понизились и отметки дна. За этот же период русло удлинилось на 3,5 км, что частично и компенсировало влияние снижения уровня моря на процесс врезания русла.

Весьма характерные процессы происходили начиная с 1961 г. в устье Амударьи. За 1961—1978 гг. уровень Аральского моря снизился на 6,5 м. Понижение же отметок уровня воды в месте

устьевого створа в 1960 г. составило приблизительно 4,5 м. Несоответствие двух упомянутых величин объясняется компенсирующим влиянием устьевого удлинения, которое за 18 лет составило 17 км и должно было привести к повышению уровня воды на устьевом участке реки в районе бывшего устьевого створа на величину $\Delta H = \Delta L I_0$, равную при «устойчивом» уклоне (см. ниже) $I_0 = 12 \cdot 10^{-5}$ около 2,0 м.

Понижение уровня приемного водоема в случае очень отлогого взморья (см. рис. 28, г) приводит к выполаживанию уклонов и аккумуляции наносов на устьевом участке реки. В результате снижения уровня озера Севан на 12—14 м в ряде районов обнажились участки побережья с очень малыми уклонами. Возникло соотношение уклонов $I < I_0$. В результате в устьях небольших рек, впадающих в озеро, вместо ожидаемых процессов врезания стал происходить обратный процесс: аккумуляция наносов, повышение отметок дна и уровней. Началось заболачивание земель. Наконец, снижение уровня водоема при отлогом устьевом взморье может привести (и нередко приводит) к разрыву гидравлической связи между дельтовыми водотоками и приемным водоемом. В этом случае, как, например, в устье Волги, формируется обширная буферная мелководная зона с небольшими уклонами дна и водной поверхности. Это мелководное взморье шириной до 50 км, частично заросшее водной растительностью, оказывается фактически не связанным с самим морем и является, скорее, обширной затопленной поймой. Течения здесь направлены в сторону моря, они представлены частично струйными течениями в подводных бороздинах — продолжений водотоков и в искусственных каналах, а главным образом — общим медленным плоскостным потоком, зависящим в большей степени от расхода воды реки, чем от ветра.

Для объяснения, а также определения направленности и интенсивности необратимых русловых деформаций в устьях рек может быть использован гидролого-морфометрический метод [23—25]. В основе метода лежат так называемые гидролого-морфометрические зависимости, связывающие руслоформирующие расходы воды с «устойчивыми» морфометрическими характеристиками русла.

«Устойчивые», т. е. отвечающие условию, когда необратимые русловые деформации отсутствуют и русло находится в динамически равновесном состоянии, характеристики устьевых водотоков зависят прежде всего от руслоформирующего расхода воды водотока Q_{ϕ} и мутности воды в половодье s_{Π} [23—25]. На морфометрические характеристики русел влияют и другие труд-

но поддающиеся учету факторы: характер подстилающего грунта, закрепляющая роль растительности на берегах, ледовые явления и т. д.

В наиболее простой форме связи «устойчивых» характеристик водотоков (осредненных площади сечения ω_0 , ширины русла B_0 , средней глубины h_0 , скорости течения v_0 , уклона водной поверхности I_0) с Q_Φ и s_n могут быть представлены гидролого-морфометрическими зависимостями [25]:

$$\begin{aligned} \omega_0 &= K_B K_h Q_\Phi^{\frac{5}{6}}, \\ B_0 &= K_B Q_\Phi^{\frac{1}{2}}, \\ h_0 &= K_h Q_\Phi^{\frac{1}{3}}, \\ v_0 &= K_v Q_\Phi^{\frac{1}{6}}, \\ \frac{B_0}{h_0} &= \frac{K_B}{K_h} Q_\Phi^{\frac{1}{6}}, \\ I_0 &= K_I Q_\Phi^{-\frac{1}{9}}, \end{aligned} \quad (5.2)$$

где коэффициенты K зависят от местных условий и индивидуальны для каждой дельты, причем $K_B + K_h + K_v = 1$ (табл. 9).

Т а б л и ц а 9

Коэффициенты в гидролого-морфометрических зависимостях вида (5.2) для различных дельт [25]

Дельта	K_B	K_h	K_v	$K_I \cdot 10^5$
Енисей	25,0	0,28	0,14	—
Печоры	10,0	0,50	0,20	—
Лены	21,0	0,28	0,17	—
Оби	12,5	0,40	0,20	—
Волги	7,0	0,57	0,25	5,3
Дуная	5,9	0,61	0,28	8,0
Кубани	4,8	0,62	0,34	—
Куры	4,9	0,49	0,42	—
Терека	4,3	0,47	0,50	40,0
Амударьи	4,6	0,36	0,60	31,7

Заметим, что руслоформирующие расходы воды реки (водотока) Q_Φ определяются либо по максимуму кривой $pR = f(Q)$, где p — повторяемость расходов воды в течение года, либо как средние максимальные годовые расходы воды.

Выявлена связь коэффициентов K с мутностью воды. При одних и тех же руслоформирующих расходах воды ширина B и площадь сечения Bh русел дельтовых водотоков у рек с малой мутностью воды заметно больше, а скорость течения v существенно меньше, чем у рек с большой мутностью воды. Эта зависимость величин K от мутности воды позволила получить гидролого-морфометрические зависимости в универсальной (пригодной для любых устьев рек) форме (табл. 10). Эти зависимости позволяют рассчитывать «устойчивые» значения гидравлических и морфометрических характеристик дельтовых водотоков любых дельт.

Т а б л и ц а 10

Универсальные гидролого-морфометрические зависимости для водотоков дельт

Характеристика	$s_n < 1 \text{ кг/м}^3$	$s_n < 1 \text{ кг/м}^3$
ω_0	$2,94 \cdot Q_\Phi^{0,83} s_n^{-0,19}$	$2,94 \cdot Q_\Phi^{0,83} s_n^{-0,33}$
B_0	$4,60 \cdot Q_\Phi^{0,50} s_n^{-0,35}$	$4,60 \cdot Q_\Phi^{0,50}$
h_0	$0,65 \cdot Q_\Phi^{0,33} s_n^{0,16}$	$0,65 \cdot Q_\Phi^{0,33} s_n^{-0,33}$
v_0	$0,34 \cdot Q_\Phi^{0,17} s_n^{0,19}$	$0,34 \cdot Q_\Phi^{0,17} s_n^{0,33}$
I_0	$8,26 \cdot 10^{-5} Q_\Phi^{-0,11} s_n^{0,17}$	$8,26 \cdot 10^{-5} Q_\Phi^{-0,11} s_n^{1,10}$

Сравнение фактических и «устойчивых» характеристик водотоков дает возможность выявить направленность и интенсивность русловых процессов. Критерии направленности (тенденции) русловых деформаций приведены в табл. 11. Чем сильнее отличаются друг от друга фактические и «устойчивые» характеристики, тем интенсивнее происходят процессы эрозии или аккумуляции.

Т а б л и ц а 11

Критерии направленности необратимых русловых деформаций в водотоках устьев рек

Активизация, размыв водотока	Отмирание, заиление водотока
$\omega < \omega_0$	$\omega > \omega_0$
$v > v_0$	$v < v_0$
$B < B_0$	$B > B_0$
$h > h_0$	$h < h_0$
$I > I_0$	$I < I_0$
$\frac{B}{h} < \frac{B_0}{h_0}$	$\frac{B}{h} > \frac{B_0}{h_0}$

К нарушению устойчивости водотоков и возникновению различий между фактическими и «устойчивыми» характеристиками русла, вызывающих необратимые русловые деформации, могут привести следующие причины: 1) естественные или антропогенные изменения Q_{ϕ} и s_{Π} , ведущие к изменению «устойчивых» значений характеристик; 2) изменения фактических значений характеристик в результате естественных процессов или хозяйственных мероприятий. К числу последних относятся: естественные или антропогенные изменения длины русла, изменения фонового уровня приемного водоема, предшествующие естественные или искусственные изменения поперечных размеров водотоков (естественные — размыв, заиление; искусственные — углубление, сужение, расширение и т. д.).

Для объяснения и качественного прогноза процессов формирования продольного профиля русла на устьевом участке реки и сопутствующих крупномасштабных вертикальных русловых деформаций может быть применена концепция «устойчивого» уклона. «Устойчивый» уклон I_0 (уклон состояния динамического равновесия русла), при котором должны отсутствовать необратимые русловые деформации, зависит от руслоформирующего расхода воды Q_{ϕ} и мутности воды в половодье s_{Π} и определяется с помощью последней формулы системы (5.2) и табл. 9 или 10.

Направленность и интенсивность вертикальных деформаций продольного профиля русла на устьевом участке зависят от того, в какую сторону и насколько различаются между собой фактический уклон водной поверхности I при руслоформирующих расходах воды и «устойчивый» уклон I_0 .

Фактический уклон водной поверхности на устьевом участке реки I может измениться в основном под влиянием двух причин — изменения длины русла L и изменения фонового уровня приемного водоема (моря) $H_{\text{м}}$. К уменьшению I ведут: повышение уровня моря $H_{\text{м}}$ и увеличение L вследствие устьевого удлинения, т. е. выдвигания дельты в море, меандрирования русла на устьевом участке или искусственного наращивания молдов на баровом участке. К увеличению I ведут: понижение уровня моря $H_{\text{м}}$ в случае приглубого взморья ($i_{\text{взм}} > I_0$) и уменьшение L вследствие естественного или искусственного сокращения длины русла (при спрямлении излучин) или абразии морского края дельты. Если уклон дна взморья очень мал ($i_{\text{взм}} > I_0$), то понижение уровня моря вызывает не увеличение, а уменьшение I .

«Устойчивый» уклон водной поверхности I_0 увеличивается, во-первых, вследствие уменьшения руслоформирующего расхо-

да воды Q_{ϕ} (в результате естественного климатического и антропогенного сокращения стока воды в бассейне, регулирования или изъятия руслового стока) и, во-вторых, вследствие естественного или антропогенного увеличения мутности воды в половодье $s_{п}$. I_0 уменьшается вследствие, во-первых, естественного или антропогенного увеличения водоносности реки, а во-вторых, естественного или антропогенного уменьшения мутности воды реки.

При $I = I_0$ на устьевом участке реки не должны происходить направленные русловые деформации. При $I > I_0$ происходят эрозия и понижение русла; при $I < I_0$ — аккумуляция наносов и повышение русла. Типизация различных случаев эрозионно-аккумулятивных процессов на устьевых участках рек приведена в табл. 12.

Т а б л и ц а 12

Типизация эрозионно-аккумулятивных процессов в водотоках в устьях рек, основанная на сравнении фактического и «устойчивого» уклонов водной поверхности

Фактор	Изменение фактора	Изменение		Соотношение уклонов	Характер процесса
		I_0	I		
Руслоформирующий расход воды, Q_{ϕ}	+	-		$I > I_0$	эрозия
То же	-	+		$I < I_0$	аккумуляция
Мутность воды в половодье, $s_{п}$	+	+		$I < I_0$	аккумуляция
То же	-	-		$I > I_0$	эрозия
Длина русла, L	+		-	$I < I_0$	аккумуляция
То же	-		+	$I > I_0$	эрозия
Уровень моря, $H_{м}$	+		-	$I < I_0$	аккумуляция
То же	-		+	$I > I_0$	эрозия
То же	-		-**	$I < I_0$	аккумуляция

Примечание. Плюс (+) означает увеличение (повышение), минус (-) — уменьшение (понижение).

* $i_{взм} > I_0$;

** $i_{взм} < I_0$.

Обратимые (знакопеременные) русловые деформации, типичные для обычных рек, в устьях рек, как правило, затушеваны более мощными упомянутыми выше необратимыми деформациями.

Вблизи моря в условиях переменного подпора и небольших колебаний уровня речные перекаты выражены обычно слабо. Но для устьев рек характерны свои типичные русловые формы — устьевые бары и устьевые косы (разд. 5.5), гряды в узлах разветвления рукавов, «ямы» местного размыва, приуроченные к линзам легко размываемых грунтов.

В крупных многорукавных дельтах (особенно вдали от моря) перекатные участки в узлах разветвления рукавов, в местах расширения русла, на участках изменения знака кривизны русла имеют много общего с аналогичными перекатами на многорукавных участках равнинных рек.

Меандрируют в дельтах обычно наиболее старые рукава, причем, как правило, уменьшающие свою водоносность. Молодые, недавно возникшие рукава, как правило, более прямолинейны.

Между обратимыми и необратимыми русловыми деформациями в устьях рек имеется определенная связь. Отмирание рукавов часто сопровождается меандрированием русла, а само меандрирование, увеличивающее длину русла, способствует возрастанию его гидравлических сопротивлений и как следствие уменьшению его водоносности и отмиранию. Отмирание небольших боковых рукавов становится причиной искривления главного русла, стимулирующего его меандрирование.

5.5. Динамика устьевых баров

Устьевой бар — это конечное звено в русловой сети дельты, морфологическое образование в наиболее активной части устьевого конуса выноса, генетически связанное с отложением речных наносов при втекании потока в водоем. Одновременно с этим устьевой бар является начальной формой нового деления русла на рукаве и возникновения новой части дельты. Основные факторы образования устьевого бара — сток воды и наносов водотока; основные разрушающие факторы — морское волнение и приливные течения.

Элементами устьевого бара служат устьевые косы, баровая отмель или баровый осередок, баровые ложбины (рис. 30).

В зависимости от сочетания создающих и разрушающих факторов в разных дельтах формируются бары разного типа, формы и размера (рис. 31).

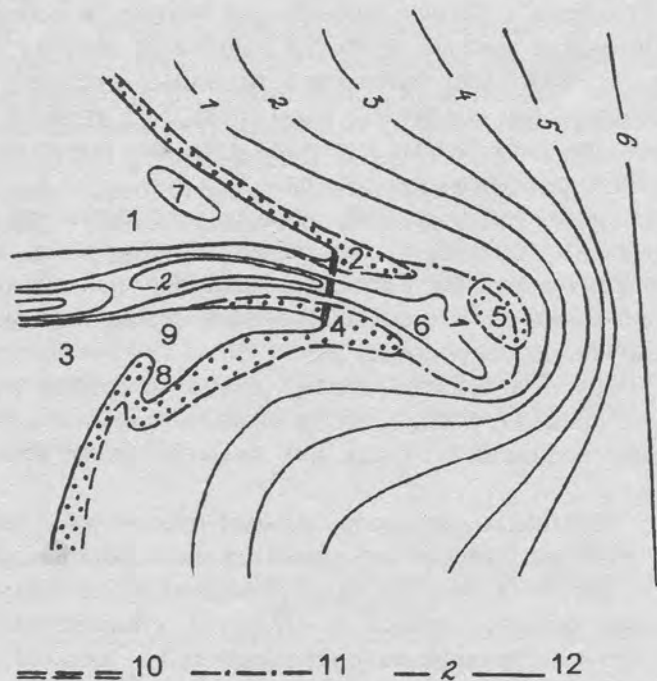


Рис. 30. Схема устьевых баров:

1 — левая устьевая коса, 2 — ее подводная часть, 3 — правая устьевая коса, 4 — ее подводная часть, 5 — баровый осередок (в данном случае подводный), 6 — баровая ложбина, 7 — изолированная лагуна, 8 — морская коса (береговой бар), 9 — полуизолированная лагуна, 10 — устьевой створ, 11 — гребень бара, 12 — изобаты, м

В непреливных устьях рек морфометрические характеристики устьевых баров связаны с определяющими факторами приближенными эмпирическими зависимостями, полученными В. Ф. Полонским:

$$l_{\bar{6}} = K_l Q_{\Phi}^{0,47} s_{\Pi}^{-0,56}, \quad (5.3)$$

$$h_{\bar{6}} = K_h Q_{\Phi}^{0,36} s_{\Pi}^{0,15}, \quad (5.4)$$

где $l_{\bar{6}}$ — длина бара (измеряется от устьевых створа до гребня бара), $h_{\bar{6}}$ — наибольшая глубина на гребне бара, Q_{Φ} — руслоформирующий расход воды рукава, s_{Π} — мутность воды в половодье, K_l и K_h — коэффициенты, зависящие от соотношения стока наносов рукава и энергии морского волнения. Чем больше относительная роль волнения, тем K_l меньше, а K_h больше.

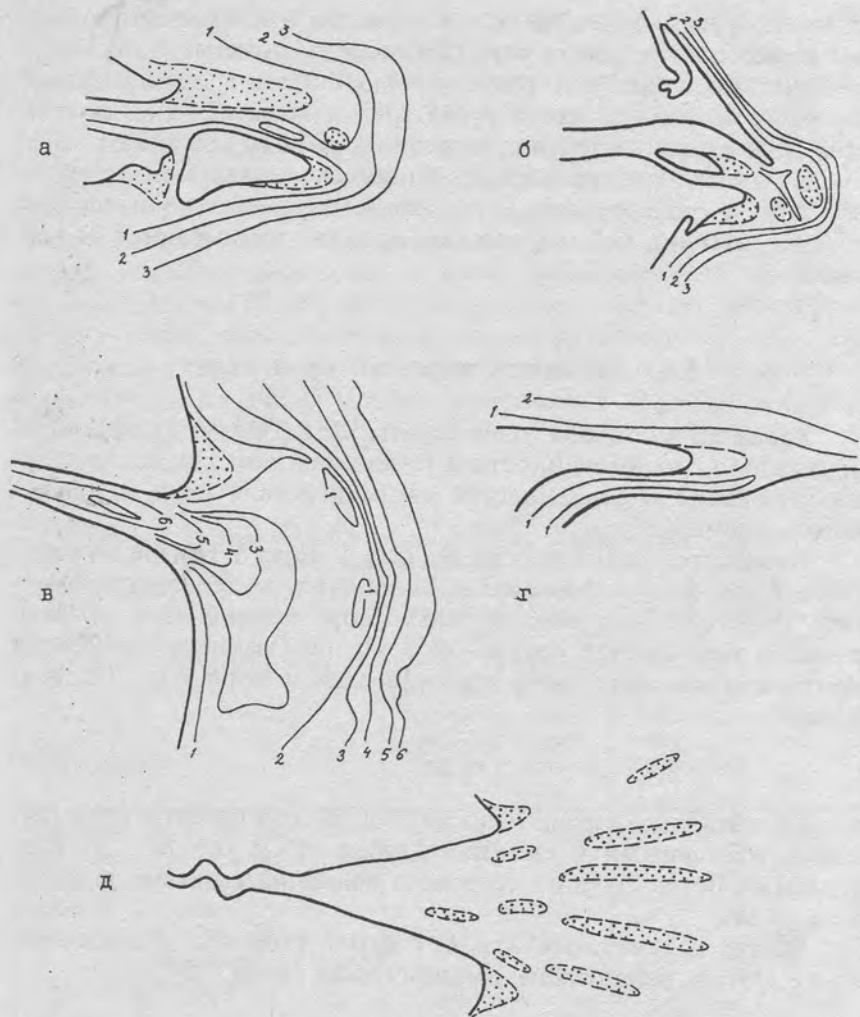


Рис. 31. Устьевые бары, формирующиеся при различном сочетании речных и морских факторов:

а — рукав Урдабай в дельте Амударьи, б — Сулак, в — рукав Быстрый в дельте Дуная, г — устье малой реки, д — устье Темзы (сильное влияние приливов). От а к г возрастает относительная роль волнения. Изобаты в м

Зависимости (5.3)—(5.4) показывают, что в разных условиях формируются устьевые бары разной формы (см. рис. 30). Чем больше роль стока наносов, тем более вытянутую в море форму имеет бар; чем больше роль волнения, тем короче бар и слабее выдвинут в море. Поэтому перераспределение стока воды и на-

носов по рукавам дельты может привести и к изменению формы и размеров устьевого бара. Сильные приливные и отливные течения способствуют расширению бара и формированию длинных вытянутых вдоль русла гряд и ложбин. Иногда приливные и отливные течения тяготеют к разным ложбинам.

На динамику бара большое влияние оказывает внутригодовой режим стока рукава. В половодье бары обычно нарастают и выдвигаются в море, в межень частично размываются волнением.

5.6. Динамика морского края дельт

Характер морского края дельты (МКД) служит хорошим индикатором направленности и интенсивности процессов дельтообразования и особенностей взаимодействия реки и приемного водоема.

Параметры выдвинутости дельты в море N и изрезанности МКД K (см. рис. 4, формулы (1.1)—(1.2)) характеризуют геометрию морского края выдвинутой в море дельты. Она, в свою очередь, оказывается связанной с так называемым размерным критерием относительного влияния реки и моря λ кг/Дж, равным

$$\lambda = r/E, \quad (5.5)$$

где r — удельный расход наносов, т. е. расход наносов реки (рукава), отнесенный к единице длины МКД ($r = RL_{\text{МКД}}$), E — удельный поток энергии ветрового волнения согласно выражению (4.14).

Между параметрами N и K , с одной стороны, и критерием λ — с другой, установлены эмпирические связи [25]

$$N = 0,35 \frac{r}{E} \cdot 10^5, \quad (5.6)$$

$$K = 0,12 \frac{r}{E} \cdot 10^5 + 1,05. \quad (5.7)$$

Чем больше величина λ , тем больше роль реки в формировании МКД и тем более он изрезан. Чем меньше величина λ , тем больше роль волнения в формировании МКД и тем более он выровнен. Очень изрезанный МКД иногда называют русловым, очень выровненный — прибойным.

Результаты типизации дельт по характеру МКД приведены в табл. 2 и более детально — в табл. 13.

Направленность и интенсивность динамики морского края дельты определяется балансом наносов в устье реки (разд. 4.4). В зависимости от соотношения составляющих уравнения баланса наносов (4.15) дельта и ее МКД могут либо выдвигаться в море ($\Delta W_{\text{КВ}} > 0$), либо подвергаться абразии и отступать ($\Delta W_{\text{КВ}} < 0$), либо находиться в стабильном состоянии ($\Delta W_{\text{КВ}} = 0$). Чтобы от изменения объема конуса выноса (дельты) $\pm \Delta W_{\text{КВ}}$ перейти к изменениям площади дельты $F_{\text{д}}$ или ее длины $L_{\text{д}}$, необходимо воспользоваться какой-либо геометрической моделью для тела дельты [23, 25] либо (что предпочтительнее) иметь для данной дельты эмпирические зависимости между $W_{\text{КВ}}$, $F_{\text{д}}$ и $L_{\text{д}}$. Например, для современных дельт Терека, Сулака, Килийского рукава Дуная получены единые зависимости $W_{\text{КВ}} = 0,0106L_{\text{д}}^{2,07}$ и $W_{\text{КВ}} = 0,0041F_{\text{д}}^{1,32}$ ($W_{\text{КВ}}$ в км³, $F_{\text{д}}$ в км², $L_{\text{д}}$ в км).

Таблица 13

Типизация дельт по характеру их морского края и степени взаимодействия реки и моря

Условия формирования дельты	Тип дельты по характеру ее морского края	Параметр выдвинутости дельты в море, N	Параметр изрезанности морского края дельты, K	Критерий относительного влияния реки и моря, λ , 10^{-5} кг/Дж	Примеры дельт
Преобладающее влияние морских факторов	Б ₁ . С прямолинейным морским краем (в том числе блокированные устья)	0—0,5	≈1	0—1,5	Нил, Сенегал
	Б ₂ . Дугообразные, с выровненным морским краем	0,5—1	1—1,4	1,5—3	Яна, Нигер
Приблизительно равноценное влияние морских и речных факторов	Б ₃ . Дугообразные, с изрезанным морским краем	1—2	1,4—1,7	3—6	Дунай, Лена
Преобладающее влияние речных факторов	Б ₄ . Лопастные, со слабо расчлененным морским краем	2—4	1,7—2,4	6—10	Амударья
	Б ₅ . Лопастные, с сильно расчлененным морским краем	>4	>2,4	>10	Миссисипи

Глава 6. ТЕРМИЧЕСКИЙ И ЛЕДОВЫЙ РЕЖИМ УСТЬЕВ РЕК

6.1. Термический режим

Термический режим устьев рек определяется климатическими условиями региона. Кроме того, термический режим зависит от характера водного объекта в устье реки.

На устьевом участке преобладает термический режим, свойственный рекам. Сезонный ход температуры воды с некоторым запаздыванием повторяет изменения температуры воздуха. Однако температура ниже 0°C не опускается. Благодаря турбулентному обмену распределение температуры по глубине потока близко к равномерному.

В водоемах дельты термический режим похож на режим озера. В глубоких водоемах в условиях умеренного климата хорошо выражена вертикальная температурная стратификация — прямая летом и обратная зимой.

На устьевом взморье режим температуры воды в основном имеет черты, свойственные морям. Во многих случаях (особенно на приглубом взморье и при большом влиянии речного стока) наблюдается сильное вертикальное расслоение вод не только по солености, но и по температуре. Летом вертикальные градиенты температуры наибольшие. При этом сезонные колебания температуры быстро уменьшаются с глубиной.

Важное значение приобретает зависимость температуры замерзания воды от солености. При увеличении солености воды на каждые 10‰ температура замерзания снижается на $0,54^{\circ}\text{C}$. Поэтому на устьевом взморье с солоноватой (до 25‰) и соленой (до 40‰) водой, особенно в условиях холодного климата, температура воды зимой может понижаться при незамерзшей воде соответственно до $-1,3$ и $-2,1^{\circ}\text{C}$.

В условиях умеренного климата довольно типична разница поверхностной температуры воды в реке и море (особенно в переходные сезоны) и как следствие — большие горизонтальные градиенты температуры. Например, в устье Дуная речная вода заметно теплее морской весной и летом (апрель—август), в

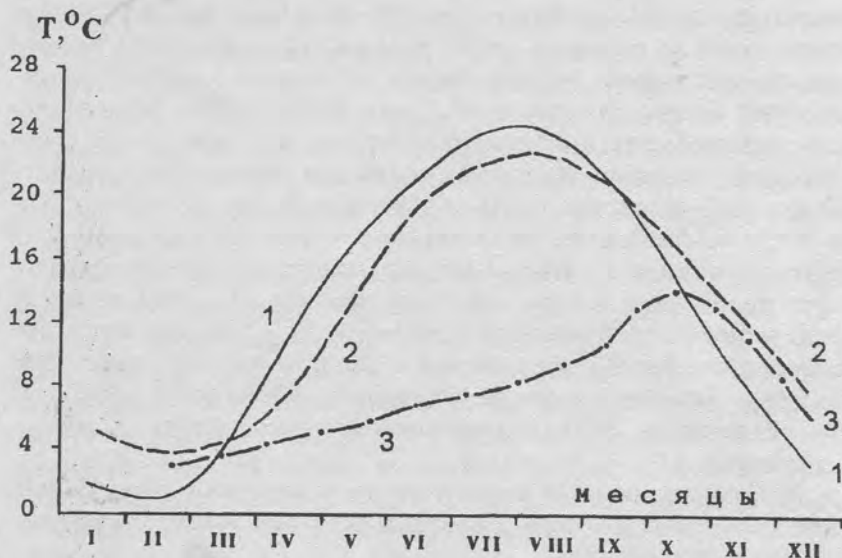


Рис. 32. Изменение средней месячной температуры воды в устье Дуная: 1 — рукав дельты (Вилково), 2 — внешняя часть устьевоего взморья (о. Змеинный), поверхность, 3 — то же, глубина 25 м

осенний же и зимний периоды (октябрь—февраль) морская вода намного теплее речной (рис. 32). На этом же рисунке обращает на себя внимание важный факт: у дна в море вода заметно холоднее, чем на поверхности, особенно в летний период нагревания поверхностного слоя. В этот период вертикальные градиенты температуры возрастают. Осенью штормы перемешивают воду, и вертикальные градиенты температуры (и солености воды тоже) уменьшаются.

Изменение температуры воды в устьевых объектах — следствие изменения составляющих их теплового баланса. Уравнение теплового баланса для любого объекта в устье реки можно записать в следующем наиболее общем виде:

$$\Delta\Theta = \Theta_{\text{п}} - \Theta_{\text{у}} + A + B + C. \quad (6.1)$$

Здесь $\Delta\Theta$ — изменение теплосодержания в водном объекте за интервал времени Δt , $\Theta_{\text{п}}$ — тепло, поступающее с водой извне (с речным стоком, с морской водой и т. д.), $\Theta_{\text{у}}$ — тепло, уходящее вместе с водой за пределы объекта. Величины теплового стока $\Theta_{\text{п}}$ и $\Theta_{\text{у}}$ выражают через $c_p \rho QT$, где c_p — удельная тепло-

емкость воды, ρ — ее плотность, Q — расход воды, T — температура воды. A означает сумму всех компонентов теплообмена через границу «вода — атмосфера». Эта сумма включает радиационный баланс R , приход $\Theta_{\text{атм}}^+$ или расход тепла $\Theta_{\text{атм}}^-$ в процессе теплообмена с атмосферой, тепло, поступающее с атмосферными осадками Θ_x , приход тепла при конденсации водяного пара $\Theta_{\text{конд}}$ и расход тепла при испарении $\Theta_{\text{исп}}$. B — это сумма всех компонентов теплообмена через границу «вода — грунт». Величина C объединяет слагаемые, связанные с тепловыми процессами в самом водном объекте, т. е. при переходе части кинетической энергии в тепловую $\Theta_{\text{кин}}$, приход тепла при льдообразовании $\Theta_{\text{лед}}$ или расход тепла при таянии (плавлении) льда $\Theta_{\text{пл}}$. Изменение теплосодержания $\Delta\Theta$ равно $c_p \rho V \Delta T$, где V — объем воды, ΔT — изменение температуры воды за интервал времени Δt .

Из уравнения (6.1) можно найти изменения температуры воды за интервал Δt при известных всех остальных составляющих теплового баланса:

$$\Delta T = \frac{\Theta_{\text{п}} - \Theta_{\text{у}} + A + B + C}{c_p \rho V}. \quad (6.2)$$

Наибольшее значение в уравнении теплового баланса в устьях рек имеют: $\Theta_{\text{п}}$ (для больших рек), радиационный баланс, теплообмен с атмосферой.

6.2. Ледовый режим

По характеру ледового режима устьевые области рек подразделяют на четыре группы: 1) устья с ежегодным длительным и устойчивым ледоставом (в России — устья Сев. Двины, Печоры, Оби, Енисея, Лены, Амура и многих других); 2) устья с неустойчивым ледяным покровом (в СНГ — устья Терека, Дуная, Днепра и др.); 3) устья, где ледовые явления бывают крайне редко и без образования ледостава (в СНГ — устья Куры, Риони); 4) устья, где ледовые явления никогда не наблюдаются (устья рек в тропиках, например Меконга, Амазонки).

В ледовом режиме устьев рек первой и частично второй группы выделяют три периода: осенних ледовых явлений (замерзания), ледостава и весенних ледовых явлений (вскрытия).

Ледовый режим устьевых участков рек первой и второй групп схож с ледовым режимом равнинных рек. Однако в связи

с раздробленностью русла в дельтах на рукава здесь более часты заторы, как во время осеннего, так и особенно во время весеннего ледохода. Заторы на устьевых участках Лены, Яны, а также Сев. Двины, Дуная и др. рек — явление обычное. Особенно мощные заторы наблюдаются в устьях рек, текущих на север. Серьезную проблему создают заторы, например, в дельте Сев. Двины. Для борьбы с заторами применяют ледоколы и взрывные работы.

На устьевом взморье ледовый режим имеет в основном морские черты. Однако наблюдается и ряд особенностей.

Так, наличие в устье реки опресненных вод с более высокой температурой замерзания способствует более быстрому льдообразованию. Этому способствует также быстрая замена соленых или солоноватых вод на опресненные или пресные при смене прилива на отлив. Морская холодная (с отрицательной температурой) вода охлаждает грунт. Сменяющая ее опресненная вода, соприкасаясь с холодным грунтом, местами замерзает, образуя донный лед.

Наращиванию льда на устьевом взморье способствует также распространение пресной воды на большие расстояния под ледяным покровом в отсутствие волнового перемешивания. Такое явление наблюдается на взморье Волги, а также Сев. Двины.

На устьевом взморье ледяной покров (припай) нередко держится дольше, чем ледостав в реке или неподвижный лед в море. Вскрытие устьевое взморья в таких случаях (типичных для арктических устьев рек) идет с двух сторон — с реки и с моря. Здесь часто долгое время сохраняются так называемые «устьевые ледяные перемычки», создающие серьезные затруднения судоходству (например, в Обской и Енисейской губах).

На очень мелководных участках взморьев арктических рек (вне русловых бороздин) вода нередко зимой промерзает до дна. Вскрытие здесь начинается с русловых бороздин, по которым весной распространяются более теплые речные воды. В таких случаях, как, например, на придельтовых участках Обской и Енисейской губ, возникают «языки вытаивания». Интересные ледовые явления наблюдаются при вскрытии на баровом участке Индигирки; здесь лед над баровыми бороздинами всплывает, образуя «ледяные серпантины». В устье же Мезени, где отмечаются сильные приливные течения, препятствующие установлению прочного ледостава, скопления больших масс мигрирующего при приливах льда создают мощные «ледяные плотины».

Важнейшей характеристикой зимнего ледового режима является толщина льда. Для ее расчета обычно применяют эмпирические формулы вида

$$h_n = a (\sum |-T|)^n, \quad (6.3)$$

где h_n — толщина льда в см, $\sum |-T|$ — сумма отрицательных температур воздуха, a и n — эмпирические параметры. Частными случаями такой формулы являются формула Ф. И. Быдина для рек

$$h_n = a \sqrt{\sum |-T|} \quad (6.4)$$

и формула Н. Н. Зубова для арктических морей

$$h_n^2 + 50h_n - 8\sum |-T| = 0. \quad (6.5)$$

В формуле (6.4) $a = 2$, если берутся средние суточные отрицательные температуры воздуха, и $a = 11$, если средние месячные. В формуле (6.5) учитываются средние суточные отрицательные температуры воздуха.

Глава 7. ГИДРОХИМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ УСТЬЕВ РЕК

Гидрохимическому режиму устьев рек свойственны черты как речного, так и морского режима. Ведущим процессом здесь является смешение речных вод с соленостью не более 0,5—1‰ и морских вод, соленость которых может изменяться в очень широком диапазоне. Так, соленость воды на морской границе зоны смешения составляет: в устьях рек Волги и Куры (Каспийское море) 10—12‰, Дуная, Риони (Черное море) — около 16, Сев. Двины (Белое море) — 25—28, Амура (Охотское море) — 30, Нила (Средиземное море) 39‰ и т. д.

Солевой состав вод в зоне смешения. Для переходной зоны от речных к морским водам в устьях рек характерна резкая трансформация солевого состава.

Речным водам с не очень большой минерализацией (до 500 мг/л) свойственно такое соотношение между главными ионами солевого состава: $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^-$; $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ + \text{K}^+$. Для вод Мирового океана соотношение противоположное: $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^-$; $\text{Na}^+ + \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+}$. Различия солевого состава речных и морских вод представлены в табл. 14.

Таблица 14

Содержание главных ионов в речной и морской воде (в %)

Главные ионы	Вода	
	речная	Мирового океана
Анионы:		
HCO_3^-	30—40	0,2
SO_4^{2-}	5—10	4,6
Cl^-	2—5	45,1
Катионы:		
Ca^{2+}	20—30	1,7
Mg^{2+}	5—10	8,8
$\text{Na}^+ + \text{K}^+$	5—10	38,6+0,8

Примечание. Сумма грамм-эквивалентов анионов и катионов принята по 50%.

Как видно из приведенных данных, принципиальными различиями солевого состава речных и морских вод являются значительное преобладание ионов HCO_3^- и Ca^{2+} в речной воде и столь же большое преобладание ионов Cl^- и Na^+ в морской.

Смена гидрокарбонатно-кальциевого состава вод на хлоридно-натриевый происходит в диапазоне солёности воды 2—4‰, т. е. во внутренней (ближней к дельте) части зоны смешения речных и морских вод.

В зоне смешения протекают разнообразные физические, химические и биологические процессы, результатом которых является трансформация химического состава вод. О характере такой трансформации легче всего судить по связи концентрации того или иного растворенного вещества с солёностью воды. Солёность воды при этом служит в качестве некоторой «реперной» характеристики, отражающей соотношение долей речной и морской воды в данном месте зоны смешения. При изучении зоны смешения солёность воды определяют в первую очередь (см. разд. 3.1). В некоторых случаях солёность воды в зоне смешения может быть рассчитана по уравнениям (3.2)—(3.3).

В предельном случае, когда химические и биологические процессы слабо влияют на содержание того или иного растворенного вещества, называемого консервативным компонентом, наблюдается линейная связь между его концентрацией и солёностью. Однако такая связь для веществ морского и речного происхождения различна.

На основе уравнения баланса солей и любого консервативного вещества морского происхождения можно получить уравнение смешения в следующем виде [34, 39]:

$$\frac{c - c_p}{c_m - c_p} = \frac{S - S_p}{S_m - S_p}, \quad (7.1)$$

где S_m , S_p и S — солёность морской, речной и смешанной воды, c_m , c_p и c — концентрация любого консервативного вещества в морской, речной и смешанной воде. Из уравнения (7.1) легко получить линейную связь между c и S в зоне смешения (c увеличивается с ростом S):

$$c = \frac{S - S_p}{S_m - S_p} (c_m - c_p) + c_p, \quad (7.2)$$

Если принять, что $S_p = 0$ и $c_p = 0$, то уравнение упрощается:

$$c = S \frac{c_M}{S_M}, \quad (7.3)$$

где c_M/S_M — доля данного вещества в солевом составе морской воды.

Наличие прямой линейной связи между S и главными компонентами солевого состава морских вод в зоне смешения подтверждается данными наблюдений. Об этом же свидетельствуют и соотношения между хлорностью и соленостью в опресненных районах морей.

Для морских вод соотношение между содержанием хлора (главного и легко определяемого компонента солевого состава) и соленостью обычно выражается формулой вида

$$S = A Cl + B, \quad (7.4)$$

где соленость S и концентрация Cl — в ‰. Согласно формуле Кнудсена (1902 г.) $A = 1,805$, $B = 0,030$; по «международной формуле» (1967 г.) $A = 1,80655$, $B = 0$.

В зоне смешения речных и морских вод соотношения между компонентами солевого состава, свойственные морской воде, нарушаются, но характер связи в целом сохраняется [34]. Так, для распресненных районов Северного Каспия (устья рек Волги и Урала) получено соотношение

$$S = 2,36 Cl + 0,14. \quad (7.5)$$

Для консервативных веществ, растворенных в достаточно больших количествах в речных водах, концентрация c в зоне смешения будет уменьшаться с ростом солености S :

$$c = -a S + b. \quad (7.6)$$

При возрастании солености с удалением от реки в сторону моря быстро уменьшается концентрация Ca^{2+} , Si и других веществ.

Эта закономерность позволяет использовать для выявления зон опресняющего влияния рек в океанах и морях помимо данных о солености воды также и сведения о содержании в водах зоны смешения кремния. Так, по наблюдениям Арктического и антарктического научно-исследовательского института, в реках, впадающих в арктические моря, содержание кремния достигает 2000 мкг/л, в то время как фоновая концентрация кремния в морских водах менее 250 мкг/л.

Поведение в зоне смешения неконсервативных веществ речного происхождения (алюминия, железа, меди, цинка и др.) более сложно. Уменьшение их концентрации с ростом солёности воды происходит быстрее, чем по линейному закону. Это свидетельствует об удалении этих веществ из раствора в результате химических и биологических процессов. К числу механизмов, в результате которых растворенные вещества могут удаляться из раствора, относятся, например, сорбция на взвешенных терригенных и биогенных частицах, химическое осаждение из раствора при достижении состояния пересыщения, биоаккумуляция (перевод растворенных веществ в состав живой биомассы, а затем — детрита) и др. В некоторых случаях возможно и дополнительное поступление веществ в раствор, например в результате диффузии из поровых вод в грунтах дна, десорбции вещества, сорбированного на взвесах, и т. д.

Данные на рис. 33 указывают на неконсервативное поведение в зоне смешения в устьях рек железа, кремния в летний период (зимой он ведет себя консервативно), фосфатов. Концентрация этих веществ с ростом солёности уменьшается.

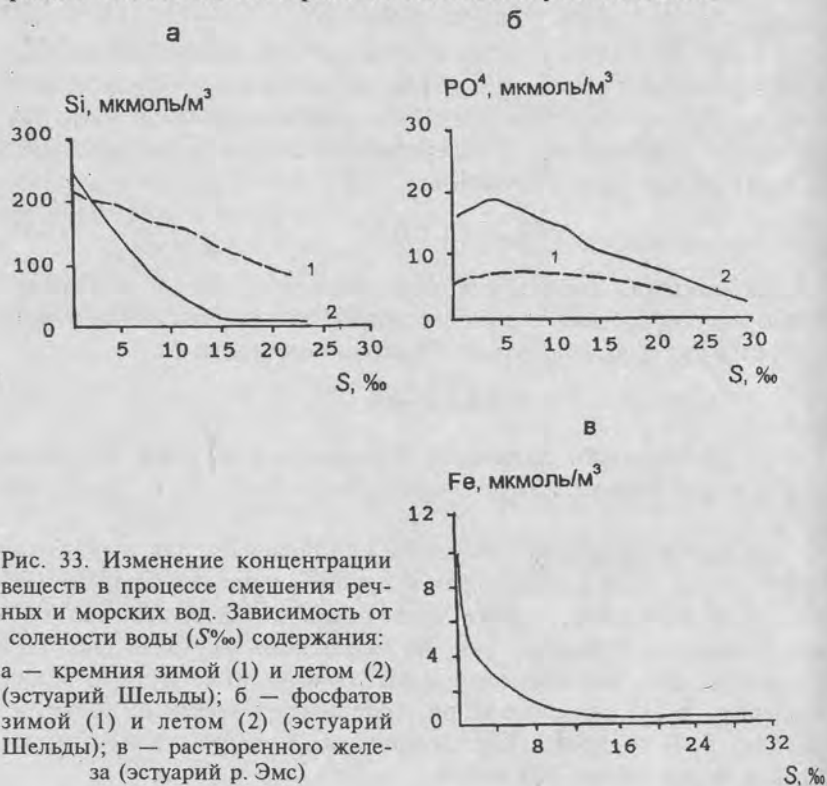


Рис. 33. Изменение концентрации веществ в процессе смешения речных и морских вод. Зависимость от солёности воды ($S_{\text{‰}}$) содержания: а — кремния зимой (1) и летом (2) (эстуарий Шельды); б — фосфатов зимой (1) и летом (2) (эстуарий Шельды); в — растворенного железа (эстуарий р. Эмс)

Режим биогенных, органических и загрязняющих веществ в устьях рек. В последние десятилетия во многие устья увеличилось поступление с речным стоком биогенных, органических и загрязняющих веществ. Кроме того, отмечено и увеличение содержания этих веществ вдоль устьевых участков рек, дельт и полузакрытых устьевых взморьев типа лиманов и лагун. Как показали, например, исследования Л.А. Журавлевой, сток органических веществ, соединений азота и фосфора в Дунае, Днестре и Днепре возрос почти в два раза. Обнаружено заметное увеличение концентрации общего фосфора вдоль устьевого участка Дуная и вдоль Днепровско-Бугского лимана. Это увеличение объясняется возросшим поступлением промышленных, коммунальных и сельскохозяйственных сточных вод, а также развитием фитопланктона. Поступление большого количества фосфора в северо-западную часть Черного моря привело к возникновению здесь дефицита кислорода.

Весьма сложна и недостаточно изучена трансформация биогенных веществ в зоне смешения речных и морских вод; ясно лишь, что поведение этих веществ неконсервативно, особенно в вегетационный период (рис. 33).

Во многих устьях рек мира, особенно в густонаселенных и промышленно развитых районах (устья Рейна, Миссисипи, Невы, Сев. Двины, Дуная, Волги и др.), отмечено ухудшение качества вод, вызванное прежде всего поступлением большого количества загрязняющих веществ. Основные источники поступления загрязняющих веществ — транзитные речные воды, приносящие загрязнение из речного бассейна, и местные источники (промышленные и коммунальные стоки, возвратные воды с орошаемых земель, загрязнения, связанные с водным транспортом, и др.). Основные виды загрязняющих веществ в устьях рек — это нефтепродукты, фенолы, тяжелые металлы.

Наблюдения в некоторых устьях рек показали, что значительная часть тяжелых металлов поступает во взвешенном состоянии, т. е. в сорбированном на взвесах виде; при увеличении солёности они могут десорбироваться, переходя в раствор.

Весьма опасным является накопление загрязняющих веществ в донных отложениях, чему способствует активная аккумуляция взвесей с сорбированными на них загрязняющими веществами в устьях рек. При повышении уровня моря (как в настоящее время в устьях рек Каспия) в результате усиления волнения возможно взмучивание грунта и вторичное загрязнение вод.

Режим растворенного кислорода в устьях рек весьма сложен. С одной стороны, сильная вертикальная расслоенность вод, разложение вынесенных рекой органических веществ, отмирание водных организмов ведут к уменьшению содержания кислорода и возникновению его дефицита. С другой — бурное развитие водорослей способствует фотосинтезу и продуцированию кислорода. В целом же увеличившаяся в последние десятилетия загрязненность вод в устьях рек приводит к уменьшению содержания кислорода, особенно в устьях рек с водой повышенной мутности, препятствующей фотосинтезу.

Изменчивость гидрохимических показателей вод в устьях рек. Гидрохимические характеристики вод в устьях рек подвержены как значительным пространственным (вдоль устьевого участка реки и устьевого взморья, по глубине и ширине потока), так и значительным временным изменениям. Гидрохимические характеристики изменяются по сезонам, во время нагонов, приливов, штормов. Наиболее важна зависимость концентрации растворенных веществ от колебаний речного стока. Обычно наблюдается обратная (гиперболическая) связь содержания растворенных веществ и расходов воды.

Глава 8. ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ УСТЬЕВ РЕК

8.1. Устьевые экосистемы, их структура и характеристики

Устьевая область реки может рассматриваться как «промежуточная» экосистема, функционирование которой определяется как внутренними специфическими устьевыми процессами (гл. 1), так и условиями на внешних границах системы («входах» системы), т. е. речными факторами (прежде всего стоком воды, наносов, растворенных веществ, тепла) на верхней (речной) границе устьевой области и морскими факторами (прежде всего уровнем моря, течениями, волнением, соленостью воды) на нижней (морской) границе устьевой области. Через эти границы на устье реки передаются все естественные и антропогенные изменения в речном бассейне или приемном водоеме.

Устье реки, и прежде всего дельта, — это система водотоков и водоемов, взаимосвязанных гидравлически и морфологически; любые естественные и особенно антропогенные изменения в этой системе (например, размыв, занесение, искусственное углубление, спрямление, перекрытие рукавов, уменьшение стока вследствие водозабора) передаются на всю систему, причем как поперек, в смежные системы водотоков, так и вниз и, что особенно важно, вверх по течению, вплоть до вершины дельты.

Экосистема устья реки, как и любая другая водная экосистема, состоит из абиотической и биотической частей (рис. 34), причем их характеристики для устьевого участка реки (дельты) и устьевого взморья (открытого и полузакрытого — залива, лимана, лагуны, эстуария) существенно различаются.

К числу основных гидролого-экологических характеристик абиотической части устьевой экосистемы относятся: для устьевого участка реки и устьевого взморья — уровень воды, температура воды, скорости стоковых течений, содержание растворенных и взвешенных веществ, свойства донных грунтов; только для устьевого участка реки (дельты) — расходы воды и нано-

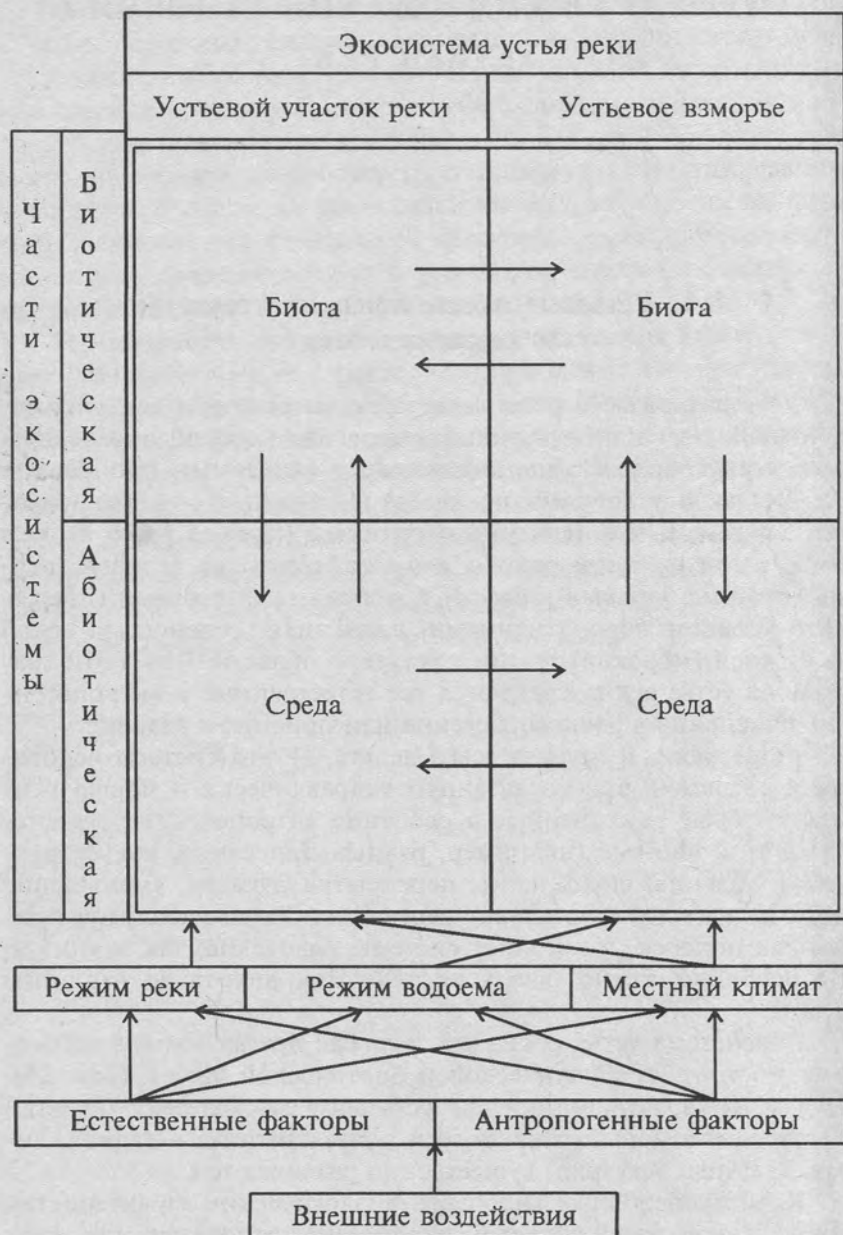


Рис. 34. Схема структуры экосистемы устьевой области реки

сов в водотоках, морфометрические характеристики водотоков (глубина, ширина), площади заливания в дельте; только для устьевого взморья — глубина, скорости ветровых течений, волнение.

Основные характеристики биотической части экосистемы устья реки — это величина биомассы, содержание фитопланктона, густота растительного покрова, разнообразие и численность животных.

Единство устьевой экосистемы проявляется во взаимодействии ее абиотических и биотических частей. С одной стороны, водная биота (ее продуктивность, видовое многообразие, величина биомассы, численность видов и др.) в значительной степени зависит от свойств водной среды (температуры, солености, мутности, прозрачности воды, скоростей течения, наличия растворенных биогенных веществ, газов, и прежде всего кислорода, загрязняющих и токсичных веществ и т. д.). Изменения перечисленных характеристик, обусловленные физическими и химическими процессами, влияют на функционирование водной биоты. С другой стороны, органическая жизнь (генерация органического вещества, развитие и отмирание организмов) влияет и на абиотические компоненты экосистемы. Биологические и биохимические процессы воздействуют на содержание в воде растворенного кислорода, двуокиси углерода и других газов, мутность и прозрачность воды, содержание других растворенных веществ.

8.2. Основные закономерности функционирования устьевых экосистем

Как показывает анализ временной изменчивости устьевых процессов и влияющих на них факторов (см. гл. 1), могут быть выделены три основных временных масштаба: 1) вековой и многолетний (с периодом от нескольких лет до столетий и тысячелетий); 2) сезонный и 3) кратковременный (с периодом от нескольких часов до нескольких суток). Природа изменений большинства определяющих факторов в основном естественная — климатическая (для вековых, многолетних и сезонных колебаний), синоптическая и приливная (для кратковременных колебаний). Однако хозяйственная деятельность может заметно повлиять на изменения факторов во всех упомянутых масштабах. Например, изъятие стока оказывает в основном многолетнее влияние, регулирование стока — многолетнее и сезонное, загрязнение вод — влияние любого временного масштаба.

Каждому виду временной изменчивости определяющих факторов соответствует и своя схема устьевых процессов. При анализе таких схем целесообразно процессы векового и многолетнего масштаба рассматривать совместно. Несмотря на различие временных периодов, процессы этих масштабов весьма сходны.

Причиной *вековых и многолетних* изменений гидролого-экологических условий устьевой области реки служат вековые и многолетние естественные и антропогенные изменения стока воды, наносов и растворенных веществ реки, вековые и многолетние естественные и антропогенные изменения уровня приемного водоема, необратимые морфологические изменения в дельте и на устьевом взморье (русловые процессы в рукавах, динамика гидрографической сети дельты, ее морского края и дна устьевого взморья), крупные гидротехнические мероприятия в пределах устья реки (обвалование и углубление рукавов, сооружение каналов и т. д.), многолетние изменения поступления загрязняющих веществ из местных источников и др.

В схеме процессов с вековым и многолетним масштабом времени могут быть выделены два взаимосвязанных, но все же достаточно автономных блока — гидролого-морфологический и качества воды.

Для описания функциональных взаимосвязей в гидролого-морфологическом блоке прежде всего должны быть учтены такие речные (индекс p) и морские (индекс m) внешние факторы (аргументы), как расход воды в вершине дельты Q_p и фоновый уровень приемного водоема (моря) H_m . Среди зависимых характеристик должны рассматриваться уровни воды в дельте H_d и на устьевом взморье $H_{взм}$, расходы воды в дельтовых рукавах Q_i , глубина; ширина, длина дельтовых рукавов h_i , B_i , L_i , уклоны водной поверхности в дельтовых рукавах I_i , площади заливания в дельте $F_{зал}$ и площади устьевого взморья $F_{взм}$.

В гидролого-морфологическом блоке наиболее важны следующие функциональные связи:

$$Q_p \rightarrow H_m, \quad (8.1)$$

$$Q_p \rightarrow Q_i \rightarrow h_i, B_i \rightarrow H_d \rightarrow F_{зал}, \quad (8.2)$$

$$H_m \rightarrow H_{взм} \rightarrow F_{взм}, L_i \rightarrow I_i \rightarrow H_d. \quad (8.3)$$

Первая из этих связей отражает косвенное влияние стока реки на уровень приемного водоема, что обычно свойственно лишь случаю втекания реки в замкнутый водоем типа Каспийского и Аральского морей, оз. Балхаш и др. Вторая связь отра-

жает длительные изменения водного режима дельты (распределения стока по рукавам, глубин в рукавах, уровней воды, площадей заливания дельты и др.) под влиянием речных факторов. Третья связь отражает длительные изменения режима устьевого взморья и приморской части дельты (уровней воды, глубин, площади взморья, длины рукавов) под влиянием морских факторов. Важно отметить, что процессы, описываемые связями (8.2)—(8.3), сопровождаются (или предопределяются) эрозионно-аккумулятивными процессами и необратимыми изменениями формы и размеров дельтовых рукавов (их глубины, ширины, длины) и дна устьевого взморья. Длины рукавов изменяются как вследствие упомянутых эрозионно-аккумулятивных процессов (а также искусственных мероприятий, например углубления каналов на взморье и организации отвалов грунта), так и в результате изменения уровня приемного водоема и пассивного смещения морского края дельты либо в сторону суши (при трансгрессии моря), либо в сторону моря (при регрессии). Изменение длины рукавов ведет, в свою очередь, к изменению уклонов и уровней воды в дельте.

Антропогенное влияние присутствует во всех связях вида (8.1)—(8.3), особенно в (8.2), и проявляется в изменении водного режима дельты под влиянием местных гидротехнических сооружений длительного действия (дамбы, каналы и т.д.).

При рассмотрении блока качества воды прежде всего должны учитываться такие речные (индекс p) и морские (индекс m) внешние факторы, как расход воды реки Q_p , мутность s_p и минерализация M_p речной воды, содержание любого, в том числе загрязняющего, вещества в речной c_p и морской c_m воде, температура речной T_p и морской T_m воды, соленость морской воды S_m . В результате сложных устьевых процессов и под влиянием внешних условий в дельте и на устьевом взморье формируются свои характеристики качества воды: мутность воды s_d и $s_{взм}$, минерализация (соленость) M_d ($S_{взм}$), температура воды T_d и $T_{взм}$, содержание растворенных веществ c_d и $c_{взм}$ (индекс d относится к дельте, $взм$ — к взморью).

В блок качества воды входят связи, отражающие долгопериодные процессы трансформации показателей качества воды (мутности и температуры воды, содержания растворенных веществ и др.). Основные функциональные связи в этом блоке следующие:

$$Q_p \rightarrow c_m, S_m, \quad (8.4)$$

$$s_p, c_p, M_p, T_p \rightarrow s_d, c_d, M_d, T_d \rightarrow s_{взм}, c_{взм}, S_{взм}, T_{взм}, \quad (8.5)$$

$$c_m, S_m, T_m \rightarrow c_{взм}, S_{взм}, T_{взм} \rightarrow c_d, M_d, T_d. \quad (8.6)$$

Первая из этих связей отражает некоторую косвенную, но важную зависимость содержания растворенных веществ в приемном водоеме от стока реки, в частности, как результат распреснения морских вод речными. Вторая связь отражает влияние реки на качество воды в дельте и на устьевом взморье. Отметим, что использование различных показателей для содержания растворенных солей в речной (минерализация) и морской (соленость) воде — дань традициям. В действительности речь идет практически об одном и том же, и поэтому изменение содержания солей при смешении речных и морских вод отражено зависимостью $S_{взм}$ от M_d . Третья связь характеризует влияние моря на устьевое взморье и приморскую часть дельты.

В связях (8.5)—(8.6) для вековых и многолетних изменений режима устья реки, а также в аналогичных связях для сезонных и кратковременных колебаний (см. ниже) не отражены для упрощения сложные и малоизученные физические, химические и биохимические процессы флокуляции, коагуляции и хемо- и биоседиментации на устьевом взморье. По этой же причине в схемах не отражено совместное влияние температуры и солености на плотность воды. Важно отметить, что в связях (8.4)—(8.6) присутствует антропогенное влияние (например, уменьшение речного стока вследствие изъятия, уменьшение мутности речной воды в результате отложения наносов в водохранилищах, усиление загрязненности речных и морских вод и т. д.).

Основной причиной *сезонных изменений* гидролого-экологических условий устья реки служат сезонные колебания стока реки, сезонные колебания уровня моря, температуры речных и морских вод, содержания в этих водах растворенных веществ. Функциональные связи для сезонного масштаба времени отличаются от вековых и многолетних прежде всего практическим отсутствием необратимых морфологических изменений русел, а также влиянием ветра (W) на сезонный ход скоростей течения (v) и волнения (h_b) на устьевом взморье.

Поскольку в сезонном масштабе времени морфологические процессы можно не учитывать, гидролого-морфологический блок в данном случае заменяется на блок гидрологический. Функциональные связи вида (8.1)—(8.6) (без морфологических изменений) сохраняют свою силу. Однако к ним необходимо добавить связь

$$W_{м, взм} \rightarrow v_{м, взм}, h_{в, взм}. \quad (8.7)$$

Основные причины *кратковременных изменений* гидролого-экологических условий в устьевой области реки — это приливные явления и резкая смена направления и силы ветра в прибрежной зоне моря и на взморье, вызывающая кратковременные сгонно-нагонные явления на взморье и в дельте, перестройку поля течений на взморье и развитие волнения. Приливы и нагоны могут привести к изменению уклонов, уровня, течений в рукавах и затоплению низких районов в приморской части дельты.

В гидрологический блок кратковременных изменений входят функциональные связи

$$\Delta H_{\text{прм}} \rightarrow \Delta H_{\text{првзм}} \rightarrow \Delta H_{\text{прд}}, \quad (8.8)$$

$$W_{\text{м}} \rightarrow \Delta H_{\text{нгм}} \rightarrow \Delta H_{\text{нгвзм}} \rightarrow \Delta H_{\text{нгд}}, \quad (8.9)$$

отражающие воздействие колебаний уровня моря приливного или синоптического масштабов (нагонов) на гидрологический режим взморья и дельты, а также связи вида (8.7), отражающие влияние штормов на течения и волнение.

В блоке качества воды при кратковременных изменениях важно упомянуть возможные связи вида

$$h_{\text{ввзм}} \rightarrow S_{\text{взм}} \quad (8.10)$$

(влияние волнения во время штормов на мутность воды на взморье),

$$S_{\text{м}}, c_{\text{м}}, T_{\text{м}} \rightarrow S_{\text{взм}}, c_{\text{взм}}, T_{\text{взм}} \rightarrow M_{\text{д}}, c_{\text{д}}, T_{\text{д}} \quad (8.11)$$

(влияние короткопериодных изменений качества морской воды приливной или синоптической природы на аналогичные характеристики на взморье и в приморской части дельты),

$$c_{\text{р}} \rightarrow c_{\text{д}} \rightarrow c_{\text{взм}} \quad (8.12)$$

(влияние эпизодических сбросов загрязняющих веществ на качество воды в дельте и на устьевом взморье).

8.3. Комплексная модель для расчета изменения гидролого-экологических характеристик устьев рек

Комплексная математическая модель позволяет рассчитывать изменения некоторых гидролого-экологических характеристик устьев рек (уровня воды, концентрации наносов, содержания растворенных веществ и газов, фитопланктона и др.)

и определять интервалы времени, в течение которых значения тех или иных гидролого-экологических характеристик не выходят за пределы, обусловленные экологическими требованиями.

В основу модели положены дифференциальные уравнения сохранения, в частности сохранения массы. Принимается, что водный объект имеет ограниченные размеры, и поэтому смешение вод в нем происходит достаточно быстро (почти мгновенно). Все гидролого-экологические характеристики заданы усредненными для всего водного объекта величинами. Пространственные изменения этих характеристик не учитываются; модель позволяет анализировать лишь временную изменчивость гидролого-экологических характеристик.

Модель может быть применена к устью в целом или к любому водному объекту в устье реки, например, устьевому водоему, одновременно связанному с рекой и смежным приемным водоемом (морем) (рис. 35). Модель включает два взаимосвязанных блока — гидрологический и качества воды.

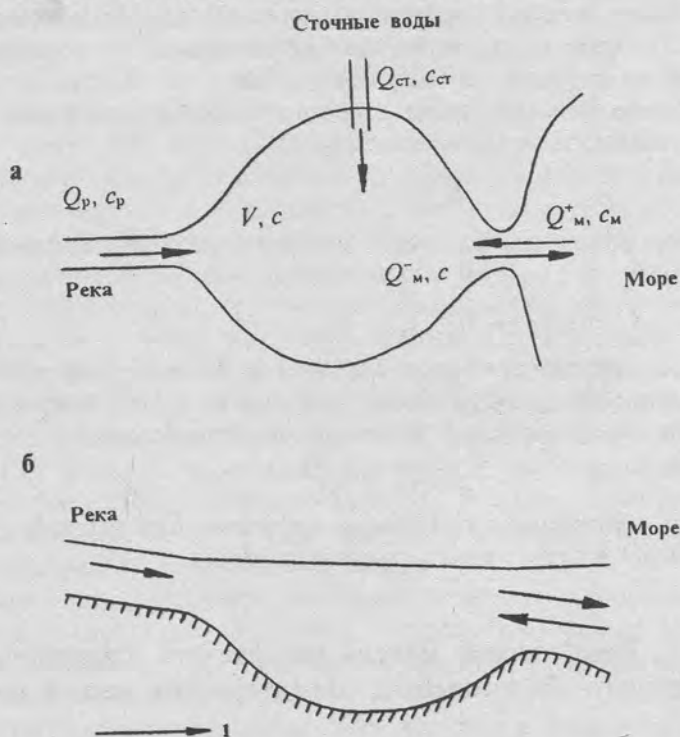


Рис. 35. Схема водного объекта в устье реки:

а — план, б — продольный профиль; 1 — направление потоков воды и содержащихся в ней веществ

Гидрологический блок. В основе этого блока лежит представленное в дифференциальной форме уравнение водного баланса рассматриваемого водного объекта:

$$\frac{dV}{dt} = \sum Q_{\text{п}} - \sum Q_{\text{y}}. \quad (8.13)$$

Здесь V — объем воды в водном объекте, а dV/dt — его изменение, причем в первом приближении

$$\frac{dV}{dt} = F \frac{dH}{dt}, \quad (8.14)$$

где F — площадь водного объекта, а dH/dt — изменение среднего уровня воды в объекте. Принято, что F мало изменяется с изменением уровня воды.

При подстановке выражения (8.14) в (8.13) получим уравнение водного баланса в несколько ином виде:

$$\frac{dH}{dt} = \frac{1}{F} (\sum Q_{\text{п}} - \sum Q_{\text{y}}). \quad (8.15)$$

$\sum Q_{\text{п}}$ и $\sum Q_{\text{y}}$ характеризуют суммарные расходы поступления воды к водному объекту и удаления воды из него (рис. 35), при этом

$$\sum Q_{\text{п}} = Q_{\text{р}} + Q_{\text{пр}} + Q_{\text{ст}} + Q_{\text{x}} + Q_{\text{м}}^+, \quad (8.16)$$

$$\sum Q_{\text{y}} = Q_{\text{вдз}} + Q_{\text{z}} + Q_{\text{м}}^-, \quad (8.17)$$

где $Q_{\text{р}}$, $Q_{\text{пр}}$, $Q_{\text{ст}}$ — соответственно расходы воды главной реки, питающей водный объект, всех местных протоков к водному объекту и сбросов сточных вод, Q_{x} — поступление воды с атмосферными осадками на поверхность водного объекта, $Q_{\text{м}}^+$ — расход воды, поступающей через пролив из смежного водоема (моря); $Q_{\text{вдз}}$ — расход искусственно забираемой воды из водного объекта при водозаборе, Q_{z} — потери воды на испарение с поверхности водного объекта, $Q_{\text{м}}^-$ — расход воды, удаляемой через пролив в смежный водоем (море).

Единицы измерения всех членов уравнений водного баланса (8.13) и (8.15) — единицы объемного расхода воды ($\text{м}^3/\text{с}$). При этом величины Q_{x} и Q_{z} могут быть выражены через осредненные за интервал Δt (в с) значения слоя осадков $x_{\text{ср}}$ и испарения $z_{\text{ср}}$ (в мм) и площадь водного объекта:

$$Q_{\text{x}} = k x_{\text{ср}} F / \Delta t, \quad (8.18)$$

$$Q_z = k z_{\text{ср}} F / \Delta t, \quad (8.19)$$

где k — множитель, равный 10^{-3} , если F задано в м^2 , и 10^3 , если F выражено в км^2 .

В простейшем случае решение уравнений (8.13) и (8.15) возможно при следующих допущениях: площадь водного объекта F задана, постоянна или мало зависит от уровня воды, все расходы поступления и удаления воды известны. В этом случае интегрирование уравнения (8.13) от $t=0$ до $t=t$ и от $V=V_0$ до $V=V$ даст:

$$V = V_0 + (\Sigma Q_{\text{п}} - \Sigma Q_{\text{у}}) t. \quad (8.20)$$

Интегрирование уравнения (8.15) в пределах от $t=0$ до $t=t$ и от $H=H_0$ до $H=H$ позволит получить

$$H = H_0 + (\Sigma Q_{\text{п}} - \Sigma Q_{\text{у}}) t / F. \quad (8.21)$$

Из последнего уравнения можно найти длительность интервала времени, в течение которого при заданных $Q_{\text{п}}$ и $Q_{\text{у}}$ уровень воды в водном объекте изменится от начального положения H_0 до некоторого заданного H_t , в том числе критического $H_{\text{кр}}$:

$$t = \frac{(H_t - H_0) F}{\Sigma Q_{\text{п}} - \Sigma Q_{\text{у}}}. \quad (8.22)$$

Блок качества воды. Изменение концентрации растворенных веществ. В настоящее время весьма актуальным становится расчет и прогноз изменения содержания растворенных веществ в устьевых водных объектах. Эту задачу рассмотрим на примере изменения в водном объекте (рис. 35) содержания некоторого неконсервативного вещества, которое поступает в водный объект с речным стоком, сточными водами, из смежного водоема (моря) и подвергается в рассматриваемом водном объекте внутренней трансформации. Поведение любого консервативного вещества будет рассматриваться затем как частный случай.

В основу модели положено уравнение баланса массы неконсервативного вещества в наиболее простом виде:

$$\frac{dm_c}{dt} = Q_{\text{р}} c_{\text{р}} + Q_{\text{ст}} c_{\text{ст}} + Q_{\text{м}}^+ c_{\text{м}} - Q_{\text{м}}^- c_{\text{м}} + \mu V c_{\text{п}} - r V c - \varepsilon F c. \quad (8.23)$$

Здесь dm_c — изменение массы рассматриваемого вещества в водном объекте, причем $dm_c = V dc$, где dc — изменение средне-

го значения концентрации вещества, V — объем водного объекта, определяемый в рамках гидрологического блока модели. Все составляющие уравнения (8.23) выражены в единицах массового расхода вещества (кг/с). Q_p и $Q_{ст}$ — расходы воды реки и сточных вод; Q_m^+ и Q_m^- — величины составляющих водообмена водного объекта с морем (Q_m^+ — расход воды, поступающей в водный объект из моря, Q_m^- — расход воды из водного объекта в море); c_p , $c_{ст}$, c_m — концентрации данного вещества соответственно в речной воде, сточных водах и в морской воде. Принимается, что концентрация вещества в воде, вытекающей в море из водного объекта, равна средней концентрации данного вещества в водном объекте c . Если же известно, насколько концентрация вещества в вытекающей воде больше, чем средняя в водном объекте, то в член Q_m^-c может быть включен коэффициент k , больший единицы: kQ_m^-c . F — площадь дна водного объекта.

Член μVc_n характеризует дополнительное поступление данного вещества вследствие его преобразования из других веществ или продукции при биохимических процессах; принимается, что это поступление пропорционально массе вещества-продукта Vc_n , где V — объем воды в водном объекте, c_n — концентрация исходного вещества-продукта, μ — коэффициент скорости продукции рассматриваемого вещества (1/с). Считается, что продукция неживого вещества не зависит от его концентрации в воде.

Член rVc характеризует расходование вещества вследствие его разложения (деструкции) или потребления организмами. Принимается, что это расходование пропорционально массе самого рассматриваемого вещества Vc , а $r = r_1 + r_2$ — коэффициент скорости расходования вещества, где r_1 — коэффициент скорости деструкции, r_2 — коэффициент скорости потребления.

Член ϵFc , как правило, характеризует убыль вещества на одной из внешних границ водного объекта, в данном случае на дне. Принимается, что этот член пропорционален площади дна водного объекта и концентрации вещества c . Здесь ϵ — скорость аккумуляции вещества на дне (м/с).

Объединим для сокращения записи все приходные составляющие баланса вещества:

$$\sum Q_i c_i = Q_p c_p + Q_{ст} c_{ст} + Q_m^+ c_m \quad (8.24)$$

и

$$M = \sum Q_i c_i + \mu Vc_n \quad (8.25)$$

Введем также замену для компонентов расходной части уравнения баланса:

$$Nc = (Q_m^- + rV + \varepsilon F)c. \quad (8.26)$$

Тогда уравнение баланса вещества (8.23) получит вид

$$\frac{dc}{dt} = \frac{1}{V}(M - cN). \quad (8.27)$$

После разделения переменных и интегрирования в пределах от $t=0$ до $t=t$ и от $c=c_0$, где c_0 — начальная концентрация при $t=0$, до $c=c$ получим

$$c = \left(c_0 - \frac{M}{N}\right) \exp\left(-\frac{N}{V}t\right) + \frac{M}{N}. \quad (8.28)$$

Весьма характерной величиной в уравнении (8.28) является отношение M/N , отражающее некоторую «равновесную» концентрацию рассматриваемого вещества. Если $M/N > c_0$, то преобладает убыль вещества и его концентрация постепенно уменьшается.

Если, например, дополнительный приход данного вещества отсутствует вовсе ($M=0$), то из уравнения (8.28) получим выражение

$$c = c_0 \exp\left(-\frac{N}{V}t\right), \quad (8.29)$$

отражающее экспоненциальное (сначала быстрое, а затем медленное) уменьшение концентрации данного вещества вплоть до значений, близких к 0. Это уменьшение идет тем быстрее, чем больше расходные компоненты (Q_m^- , rV , εF) и меньше объем водного объекта V .

Из уравнения (8.28) можно получить выражение для интервала времени, в течение которого концентрация вещества изменится от c_0 до некоторого заданного c_t , в качестве которого может быть взята «критическая» с экологической точки зрения концентрация $c_{кр}$:

$$t = \frac{V}{N} \ln \frac{c_0 - M/N}{c_t - M/N}. \quad (8.30)$$

Для случая $M=0$ (см. уравнение (8.29)) аналогично предыдущему получим

$$t = \frac{V}{N} \ln \frac{c_0}{c_t}. \quad (8.31)$$

Уравнение (8.28) позволяет рассчитывать изменение концентрации в устьевом водном объекте любых неконсервативных и консервативных веществ различного происхождения: загрязняющих веществ, поступающих с речными или сточными водами, веществ, поступающих из моря, биогенных веществ (например, фосфора), растворенных газов (например, кислорода), фитопланктона и т. д.

Рассмотрим применение данной модели более подробно на весьма актуальном примере изменения солености воды в устьевом водном объекте.

Для замены концентрации вещества (в $\text{кг}/\text{м}^3$) на соленость воды (в ‰) необходимо обе части уравнения (8.23) разделить на плотность воды, которая принимается постоянной. Тогда вместо уравнения баланса массы (8.23) (влиянием сточных вод пренебрежем) получим уравнение солевого баланса

$$\frac{dS}{dt} = \frac{1}{V} (Q_p S_p + Q_m^+ S_m - Q_m^- S), \quad (8.32)$$

где S_p , S_m и S — соленость речной, морской воды и средняя соленость воды в рассматриваемом водном объекте.

Интегрирование уравнения (8.32) в пределах от $t=0$ до $t=t$ и от $S=S_0$ до $S=S$ даст

$$S = \left(S_0 - \frac{Q_p S_p}{Q_m^-} - \frac{Q_m^+ S_m}{Q_m^-} \right) \exp \left(-\frac{Q_m^-}{V} t \right) + \frac{Q_p S_p}{Q_m^-} + \frac{Q_m^+ S_m}{Q_m^-}. \quad (8.33)$$

Время, необходимое для изменения солености воды с S_0 до S_t , будет равно

$$t = \frac{V}{Q_m^-} \ln \frac{S_0 Q_m^- - Q_p S_p - Q_m^+ S_m}{S_t Q_m^- - Q_p S_p - Q_m^+ S_m}. \quad (8.34)$$

Наиболее простые частные случаи будут следующие.

1. Приток морских осолоненных вод отсутствует ($Q_m^+ = 0$), и из водного объекта в море вытекает вода, осолоненная в предыдущий, например, межженный период. Из уравнения (8.33) в этом случае получим

$$S = \left(S_0 - \frac{Q_p S_p}{Q_m^-} \right) \exp \left(- \frac{Q_m^-}{V} t \right) + \frac{Q_p S_p}{Q_m^-}. \quad (8.35)$$

Если допустить, что $Q_m^- \approx Q_p$, т. е. через рассматриваемый водный объект осуществляется транзит речных вод в море, то получим

$$S = (S_0 - S_p) \exp \left(- \frac{Q_p}{V} t \right) + S_p. \quad (8.36)$$

И наконец, если принять, что соленость речной воды равна нулю, то получим такой простой экспоненциальный закон уменьшения солености воды

$$S = S_0 \exp \left(- \frac{Q_p}{V} t \right). \quad (8.37)$$

Уравнения (8.35)—(8.37) отражают процесс опреснения ранее осолоненного водного объекта. Это опреснение будет продолжаться до тех пор, пока соленость воды в водном объекте не приблизится к величинам $Q_p S_p / Q_m^-$ (уравнение (8.35)) и S_p (уравнение (8.36)) или нулю (уравнение (8.37)). Длительность процесса опреснения, когда соленость воды изменяется от S_0 до любой заданной величины S_t , можно определить по трем соответственным формулам:

$$t = \frac{V}{Q_m^-} \ln \frac{S_0 \frac{Q_p S_p}{Q_m^-}}{S_t - \frac{Q_p S_p}{Q_m^-}}, \quad (8.38)$$

$$t = \frac{V}{Q_p} \ln \frac{S_0 - S_p}{S_t - S_p}, \quad (8.39)$$

$$t = \frac{V}{Q_p} \ln \frac{S_0}{S_t}. \quad (8.40)$$

Время опреснения тем меньше, чем меньше объем водного объекта V и больше Q_m^- или Q_p .

2. Из рассматриваемого водного объекта вода в море не вытекает вовсе ($Q_M^- = 0$), а происходит лишь, наоборот, поступление морской воды с расходом Q_M^+ . В этом случае в уравнении (8.33) появляется неопределенность. Возникает необходимость вновь вернуться к исходному уравнению солевого баланса (8.32), решение которого даст линейный закон осолонения, т. е. увеличение солености воды в связанном с морем водном объекте:

$$S = S_0 + \frac{1}{V} (Q_p S_p + Q_M^+ S_M) t. \quad (8.41)$$

Время, необходимое для возрастания солености от S_0 до любой заданной величины S_t , будет равно

$$t = \frac{(S_t - S_0)V}{Q_p S_p + Q_M^+ S_M}. \quad (8.42)$$

Осолонение идет тем быстрее, чем меньше V и больше расход притока морских вод Q_M^+ и их соленость S_M .

Если пренебречь величиной солености речной воды, то в уравнениях (8.41) и (8.42) надо принять $Q_p S_p = 0$.

При исследовании осолонения устьевых водоемов при большом поступлении морских вод и малом притоке речных вод важнейшее значение приобретает учет величины испарения с поверхности устьевого водного объекта: чем оно больше, тем больше компенсирующий потери вод приток морских вод и интенсивнее увеличение солености воды.

8.4. Концепция устойчивости и уязвимости устьевых экосистем

Концепция устойчивости и уязвимости экосистем водных объектов в устьях рек может быть отнесена:

1. Ко всей экосистеме; при этом должны учитываться связи между абиотической и биотической ее частями. При таком комплексном подходе к устойчивости определяются пределы внешнего естественного и антропогенного воздействия на всю экосистему, и допустимыми считаются изменения абиотических компонентов системы и внутренних биологических процессов, при которых структура и функционирование всей водной экосистемы не нарушаются.

2. К абиотической части водной экосистемы, когда учитываются лишь нарушения ее гидрологических связей под влиянием внешних воздействий, например в результате естественного или антропогенного изменения речного стока воды, наносов, тепла, растворенных веществ.

3. К биотической части водной экосистемы; при этом учитываются пределы воздействия нарушения трофических цепей на структуру и функционирование водной биоты, например, вследствие болезней организмов, периодических биологических «взрывов» популяций и т. д.

Наиболее простыми гидроэкологическими подходами к анализу устойчивости водных экосистем могут быть следующие.

1. Оценка допустимости для абиотической части водной экосистемы внешних воздействий (как естественных, так и антропогенных) при условии, что целостность системы и протекающие в ней физические и химические процессы, характерные для «нормального» состояния системы, т. е. укладываемого в некоторые диапазоны изменчивости (заранее неизвестные), не нарушаются, а сам водный объект не подвергается деградации. В последнем случае речь идет о существовании самого водного объекта или об утрате им своих характерных черт, например усыхании или осолонении водоемов в устье реки в результате уменьшения стока. В ряде случаев водный объект либо перестает существовать (усыхание дельт), либо изменяет свой тип (класс), например переходит из солоноватоводного в соленое, как устьевое взморье Амударьи.

Физической и химической основой для решения проблемы такой устойчивости водного объекта должны стать: уравнения баланса воды, наносов, солей, тепла; эмпирические связи расхода воды с уровнем, глубиной, площадями затопления, соленостью воды и др.

2. Оценка предельно допустимых воздействий изменений абиотической части водной экосистемы на функционирование ее биотической части (водной биоты). В этом случае оценка, сделанная выше, переносится на условия существования и функционирования водной биоты. Могут быть рассмотрены следующие вопросы: влияние усыхания дельты на развитие высшей водной растительности, условия нереста рыб и т. д.; влияние уменьшения глубин на миграции рыб; влияние изменения ми-

нерализации воды, ее солевого состава, газового режима на водную биоту; влияние процессов заиления (аккумуляции и перераспределения наносов) на жизнь бентоса и др. Должен быть установлен биологически оптимальный гидрологический режим абиотической части среды; его радикальное изменение будет означать нарушение устойчивости экосистемы.

3. Оценка предельно допустимого для водной экосистемы изменения некоторых ключевых физико-химических характеристик (например, содержания кислорода, температуры и солености воды) или поступления вредных загрязняющих веществ. Например, рассматриваются следующие пути «удаления» загрязняющих веществ из водной среды: адвекция, диффузия, химический распад, аккумуляция на дне, сорбция органическими и минеральными веществами, биохимическая трансформация, микробное разложение и т. д. В частности, могут быть применены уравнения адвекции, диффузии, адвекции—дисперсии с учетом генерации или деструкции неконсервативного вещества и др.

Исходя из биологических критериев определяется «критическое» значение концентрации кислорода или данного загрязняющего вещества, при котором начинается нарушение структуры и функционирования водной экосистемы. Это «критическое» значение может быть определено для наиболее уязвимого биологического вида, для «ключевого» вида, для наиболее ценного вида, для совокупности видов и т. п. Последние две оценки могут быть сделаны гидрологами и гидробиологами лишь совместно.

Таким образом, под *устойчивостью водной экосистемы* в устье реки следует понимать способность экосистемы противостоять внешним естественным и антропогенным воздействиям и внутренним процессам, которые нарушают структуру и нормальное функционирование как всей экосистемы, так и отдельно ее абиотической и биотической частей. Устойчивость водной экосистемы определяется комплексом еще недостаточно изученных факторов: размером водного объекта, динамикой вод, кислородным режимом и т. д.

Уязвимость водной экосистемы — понятие, по смыслу противоположное устойчивости. *Уязвимость водной экосистемы* — это степень зависимости водной экосистемы от внешних воздействий, которые могут привести к нарушению ее структуры и функционирования, т. е. к потере ее устойчивости.

8.5. Современное состояние гидролого-экологических условий устьев рек России и сопредельных стран и тенденции их изменения

Анализ изменений, происходящих в настоящее время в устьях рек России и сопредельных стран (в пределах бывшего СССР), показал, что наибольшие антропогенные изменения стока воды и наносов отмечены на устьевых участках рек Волги, Терека, Сулака, Куры, Дуная, Днестра, Днепра, Риони, Дона, Кубани, Даугавы, Енисея, Амура, Или, Амударьи.

Наибольшие естественные и антропогенные изменения морфологического строения дельты произошли в устьях рек Волги, Урала, Терека, Сулака, Самура, Куры, Дуная, Днепра, Риони, Дона, Кубани, Преголи, Нямунаса, Даугавы, Невы, Лены, Яны, Амура, Или, Амударьи. Условия заливания дельт изменились в наибольшей степени в устьях рек Волги, Урала, Терека, Сулака, Самура, Куры, Днепра, Дона, Кубани, Невы, Или и Амударьи. Усиление проникновения осолоненных вод отмечено на устьевых участках рек Днепра, Кубани, Даугавы, Яны, Индигирки, Камчатки, Амура. Причины — это либо изъятие стока, либо зарегулирование его плотиной ГЭС, либо искусственное углубление устьевого бара, либо и то и другое. В дельтах Или и Амударьи наблюдается осолонение водоемов и грунтовых вод. Загрязнению подвержены устьевые участки большинства рек. Наиболее сильное загрязнение вод отмечено на устьевых участках Волги, Днепра, Преголи, Нямунаса, Даугавы, Невы, Сев. Двины, Оби, Яны, Индигирки, Амура.

Природный комплекс дельт (ландшафт и биоценозы) в наибольшей степени подвергся антропогенному изменению в устьях рек Волги, Урала, Терека, Днестра, Днепра, Дона, Кубани, Даугавы, Невы, Оби, Или и Амударьи.

Режим устьевого взморья в наибольшей степени изменился в устьях рек, впадающих в Каспийское море, вследствие резкого повышения его уровня (устья Волги, Урала, Терека, Сулака, Самура, Куры), а также в устье Амударьи из-за значительного понижения уровня Аральского моря. Радикально изменился режим устьевого взморья Невы. Условия опреснения вод и степень их загрязнения ухудшились на устьевых взморьях многих рек. Наиболее негативные изменения произошли на взморьях Волги, Урала, Терека, Куры, Днестра, Днепра, Дона, Даугавы, Невы, Амура, Или, Амударьи. Причины этого состоят как в уменьшении стока рек, так и в увеличении транзитного и мест-

ного загрязнения вод. Состояние биоценозов ухудшилось на взморьях рек Волги, Днестра, Днепра, Дона, Кубани, Невы, Амура, Или, Амударьи.

По совокупности изменений гидролого-экологических условий все устья рек России и сопредельных стран можно разделить на четыре категории:

- 1) с незначительными изменениями гидролого-экологических условий;
- 2) умеренно измененные;
- 3) сильно измененные;
- 4) очень сильно измененные.

К первой группе (незначительно измененных) относится ряд устьев рек водосборов Белого, Карского морей, моря Лаптевых, Восточно-Сибирского и Берингова морей, пока слабо подверженных антропогенному воздействию. В этой группе оказались устья Хатанги и Анадыря, Мезени и Кулоя, Пура, Таза, Колымы.

Во вторую группу (умеренно измененных) попали устья рек Онеги, Лены, Сев. Двины, Печоры, Индигирки, Камчатки, Яны, Оби, Енисея, Юж. Буга, Самура.

К третьей группе (сильно измененных) относятся устья рек Дуная, Риони, Преголи, Нямунаса, Амура, Днестра, Урала, Сулака, Кубани, Терека, Куры, Дона, Днепра, Даугавы, Невы, Волги, Или. В наибольшей степени подверглись изменениям пять последних устьев.

И наконец, в четвертую группу (очень сильно измененных) попало устье Амударьи (сюда же можно отнести и устье Сырдарьи), многие компоненты природных условий которого находятся в стадии глубокой деградации.

Выявленные для отдельных устьев рек тенденции изменения гидролого-экологических условий свидетельствуют о следующих общих закономерностях.

1. Постепенно и неуклонно сокращается количество рек, сток воды и наносов которых находится в состоянии близком к естественному; сток остальных, уже зарегулированных рек продолжает изменяться. Это означает, что сохраняется и усиливается тенденция все большей зависимости режима устьев рек от антропогенных изменений речного стока.

2. Усиливается загрязненность речных вод; возрастает и роль местного загрязнения вод, источником которого становятся промышленные и коммунальные предприятия в устьях рек, сельское хозяйство и водный (как речной, так и морской) транс-

порт в пределах устьев рек. Во многих случаях загрязнение вод приобретает угрожающий характер.

3. На морфологическое строение и режим устьев рек, а также на их природные условия в целом все большее влияние оказывают гидротехнические и водохозяйственные мероприятия в пределах дельт. Если раньше полностью урбанизированными и искусственно измененными устьями могли считаться лишь устья Невы и Даугавы, то теперь почти полностью освоены и частично зарегулированы дельты Волги, Урала, Терека, Сулака, Кубани, Или и др. Руслорегулирующие и дноуглубительные работы проводятся в большинстве устьев рек.

4. Усиливается влияние повышения уровня приемного водоема на режим устьев рек. Это относится не только к устьям рек, втекающих в Каспийское море с поднимающимся уровнем, но ко всем устьям рек, впадающих в окраинные и даже внутренние моря, связанные с Мировым океаном. Что касается Каспийского моря, то здесь в будущем возможна его стабилизация на отметках -26 — $-26,5$ м абс. или даже снижение. Для Мирового океана в современных условиях характерен эвстатический подъем уровня с увеличивающейся интенсивностью. По современным оценкам, к 2030 г. возможен подъем уровня океана по сравнению с современным в среднем на 18 см (от 8 до 29 см), а к 2070 г. — уже в среднем на 44 см (от 21 до 71 см). Очевидно, что такие изменения уровня океана в сильной степени скажутся на режиме устьев рек.

5. Общая тенденция изменения гидролого-экологических условий в устьях рек будет проявляться как в ухудшении отдельных показателей, так и в постепенном переходе устьев рек из низших категорий в более высокие. На грани перехода в иную («худшую») категорию уже находятся устья рек Лены, Колымы, Камчатки (для перехода во вторую категорию), Днестра (для перехода в третью категорию), Или (для перехода в четвертую категорию). Устьевая область Амударьи близка к полной деградации.

Глава 9. ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ УСТЬЕВ РЕК И НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ РАЦИОНАЛЬНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ И ОХРАНЫ ИХ ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ

Многие устья рек широко используются различными отраслями народного хозяйства (сельским, рыбным, водным транспортом). В процессе использования природных ресурсов устьев рек возникают сложные водохозяйственные проблемы. К числу наиболее важных можно отнести следующие.

1. Необходимость одновременного удовлетворения противоречивых запросов сельского и рыбного хозяйства. Первая из этих отраслей требует расширения незатопляемых площадей суши в дельтах рек и мелиорации земель. Вторая отрасль нуждается в сохранении по возможности в естественном состоянии нерестилищ — водоемов и затопляемых пространств дельты или даже их расширения. В условиях дефицита водных ресурсов эти противоречивые потребности сельского и рыбного хозяйства часто вынуждают искусственно перераспределять воды по пространству устья.

2. Необходимость удовлетворения противоречивых потребностей сельского хозяйства в различные сезоны года. В периоды половодья и паводков во многих дельтах требуется инженерная защита земель от заливания путем сооружения дорогостоящих систем противопаводочных дамб обвалования. В засушливый период года требуется, наоборот, осуществление оросительных и обводнительных мелиораций с сооружением систем каналов, насосных станций и т. д. В ряде случаев удовлетворение этих противоречивых запросов требует регулирования стока самой реки.

3. Необходимость улучшения судоходных условий на мелководных и разветвленных участках русла и устьевых баров для осуществления транзитной навигации из моря в реку и наоборот. Это требует проведения дорогостоящих дноуглубительных и русловыправительных работ.

При решении перечисленных и многих других водохозяйственных проблем должны учитываться закономерности естественных и антропогенных изменений режима, морфологии и экологии устьев рек. Уже имеется большой положительный

опыт такого учета для устьев рек Волги, Терека, Дона, Кубани, Дуная и др. В то же время известно множество случаев неудачного проведения водохозяйственных мероприятий в устьях рек. К наиболее частым серьезным просчетам при планировании и осуществлении гидротехнических мероприятий относятся следующие.

1. Проведение водохозяйственных мероприятий без учета тенденции развития дельтовых водотоков (их активизации или отмирания), и в частности строительство водозаборов и других гидротехнических сооружений на отмирающих рукавах. Водозабор из таких рукавов ускоряет их заиливание и отмирание, водозаборное сооружение заиливается, а водоток нередко через некоторое время вообще остается без воды. Такие случаи отмечены в дельтах Дуная, Амударьи, Терека.

2. Неучет последствий искусственного углубления некоторых рукавов и устьевых баров. Такое углубление нередко ведет к перераспределению стока воды в углубленный рукав, к его временной активизации, ускорению его устьевого удлинения с последующим отмиранием (в дельтах Дуная, Дона и др.). Углубление устьевых баров для целей судоходства нередко стимулирует проникновение в водоток осолоненных морских вод с нежелательными последствиями для экологических условий и водоснабжения (в дельте Яны).

3. Неучет последствий обвалования дельтовых островов, выводящих земли из состояния активного водообмена с основным руслом. Глухое обвалование приводит к сосредоточению стока в период половодья в главном русле, повышению уровней воды и скоростей течения, создающих опасность размыва и прорыва дамб обвалования.

4. Неучет влияния на гидравлику русловой системы местных выправительных сооружений. Так, местные полузапруды в рукаве Кубань, призванные, по предположениям, улучшить условия водозабора из этого рукава, в действительности привели к обратному эффекту — оттоку вод в смежный рукав Протока.

Рациональное использование природных ресурсов устьев рек и предотвращение или минимизация негативных изменений гидролого-экологических условий требуют, во-первых, обязательного учета закономерностей и тенденций процессов, происходящих в устьях рек, а во-вторых, проведения научно обоснованных регулирующих мероприятий. При этом должны быть просчитаны и оценены возможные последствия для устьевой области реки любых крупных водохозяйственных мероприятий, осуществляемых не только в пределах устья, но и во всем речном бассейне.

Стратегия управления режимом устьев рек должна строиться на трех уровнях: 1) общебассейновом (регулирование стока воды и наносов реки); 2) региональном (искусственное перераспределение речного стока в пределах дельты и «зонирование» устьевой области, т. е. распределение отдельных ее частей между различными отраслями хозяйства); 3) местном (локальном) (регулирование отдельных водотоков и водоемов или их частей).

Наиболее радикальными мерами по управлению как процессом дельтообразования, так и режимом устья реки является регулирование стока воды и наносов реки. Таким образом можно замедлить или ускорить процесс развития дельты, предотвратить наводнения, оптимизировать процесс заливания дельты, предотвратить нежелательные явления проникновения в русла осолоненных морских вод и т. д. Однако возможности такого способа регулирования устьевых процессов ограничены, так как сооружение специально для этих целей крупных гидрозлов в речном бассейне сопряжено с большими затратами. Кроме того, крупное гидротехническое строительство в речных бассейнах обычно преследует, как правило, иные цели.

Перераспределение речного стока в пределах устьевой области — более реальная и эффективная мера. Кроме того, она, видимо, единственная в случаях дефицита водных ресурсов в речном бассейне. Вододелители, перераспределяющие воду в пределах дельты, уже действуют в устьях Волги, Терека, Кубани и др. Такие вододелители, кроме того, способствуют более рациональному распределению площади устьевой области между разными отраслями хозяйства, например сельским (орошаемые угодья, сенокосы и др.) и рыбным (нерестилища, выростные угодья и др.). Попытки распределения разных частей дельты между разными потребителями делаются в устьях Волги, Терека, Дуная.

Местные выправительные и регулирующие мероприятия проводятся во многих устьях, хотя и в ряде случаев при их осуществлении не учитывались должным образом возможные последствия. К локальным мероприятиям можно отнести, прежде всего, следующие: выправление и углубление перекатов и устьевых баров для целей судоходства; спрямление излучин как для целей судоходства, так и для снижения уровней воды; обвалование рукавов; сооружение полузапруд; перекрытие небольших рукавов; сооружение водозаборов; регулирование водообмена с водоемами и т. д. Главным условием осуществления таких мероприятий должен быть гидравлический расчет их последствий. Необходимо иметь в виду, что любое, даже локаль-

ное, вмешательство в режим единой русловой сети дельты с неизбежностью отразится не только на режиме звеньев русловой сети, расположенных ниже по течению от места вмешательства, но и на режиме всей русловой сети дельты, т. е. выше по течению и в смежных водотоках.

Особое внимание должно быть уделено предотвращению или уменьшению загрязнения поверхностных и подземных вод в устьях рек и их почвенного покрова. Необходимо иметь в виду, что многие загрязняющие вещества накапливаются в донных отложениях в устьях рек (в водотоках и водоемах дельты, на дне устьевого взморья), что создает большую опасность вторичного загрязнения, например, при размыве водотоков и штормовом волнении на взморье.

Для сохранения уникальных природных комплексов в устьях рек целесообразно часть территории и акватории устьевой области (дельты и устьевого взморья), особенно в крупных устьях, оставить в естественном состоянии в виде заповедников и заказников, как это уже сделано в устьях Волги и Дуная. По-видимому, целесообразно организовать заповедники и в устьях других рек, например сибирских (в дельтах Лены и Яны).

Для каждой крупной устьевой области реки должна быть разработана комплексная схема рационального использования и охраны водных ресурсов. Такая схема должна включать научно обоснованную систему регулирования режима устья реки или управления им. Кроме того, в схему может войти распределение площади устьевой области между заинтересованными отраслями хозяйства, включая заповедники и заказники.

Глава 10. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ УСТЬЕВ РЕК

10.1. Наблюдения в устьях рек и научные основы их гидролого-экологического мониторинга

Происходящие изменения природного комплекса устьев рек, ухудшение их экологических условий и необходимость разработки мероприятий по рациональному использованию и охране природных ресурсов устьев рек требуют контроля за состоянием этих объектов. Функции такого контроля должен выполнять постоянно действующий гидролого-экологический мониторинг устьев рек.

При выборе концепции такого мониторинга необходимо прежде всего уточнить понятие термина «мониторинг». В отечественной практике понятие мониторинга обычно сводят к наблюдениям за загрязнением природной среды. Иногда под мониторингом водной среды понимают контроль за качеством воды. Часто функцией мониторинга считают наблюдения, оценку и прогноз только антропогенных изменений среды.

По нашему мнению, приведенные выше толкования термина «мониторинг» слишком узки и неприменимы к таким сложным природным объектам, как устья рек. Во-первых, для устьев рек большое значение имеют не только показатели загрязненности вод или даже качества воды в целом, но важное значение приобретает комплекс гидрологических характеристик — сток и уровни воды, площади заливания, площади опреснения, интенсивность морфологических изменений и т. д. Во-вторых, в устьях рек функции мониторинга нельзя сводить лишь к контролю антропогенных изменений природной среды. Для них характерна большая естественная изменчивость режима и природного комплекса, которая также требует слежения и анализа.

Под гидролого-экологическим мониторингом устьев рек, по нашему мнению, следует понимать мониторинг комплекса гидролого-экологических условий устьев рек и их естественных и антропогенных изменений.

Мониторингу в устьях рек должны быть подвергнуты все составные части этих объектов: устьевой участок, включая рус-

ловую сеть, водоемы и поверхность дельты, устьевое взморье со всеми его элементами. Предметом мониторинга должны явиться все гидролого-экологические характеристики устья реки, а не только показатели загрязнения и качества воды. К числу элементов гидролого-экологического мониторинга следует отнести комплекс количественных и качественных показателей гидролого-экологических условий устьев рек и их изменчивости. В этот комплекс должны прежде всего входить характеристики стока воды, наносов и солей в вершине устьевой области и их распределение по рукавам дельты; мутность, прозрачность и минерализация (соленость) воды; уровни воды и площади заливания поймы и дельты; скорости течения; температура воды и характеристики ледового режима; солевой состав воды и содержание в ней растворенных минеральных, органических, биогенных, загрязняющих веществ, растворенных газов и т. д.; механический состав наносов и грунтов дна; состояние водной биоты и почвенно-растительного покрова дельты.

В функции гидролого-экологического мониторинга устьев рек должны входить: наблюдения за состоянием гидролого-экологических условий; сбор, обработка и накопление данных наблюдений; анализ данных; расчет неизвестных или трудноизмеряемых характеристик по известным или легкоизмеряемым; распространение данных измерений в отдельных пунктах (постах, створах, станциях) в пространстве; расчет и прогноз ожидаемых изменений гидролого-экологических условий; оценка возможных экологических, экономических и социальных последствий этих изменений; передача оперативной информации потребителям (местным сельскохозяйственным, рыбохозяйственным, водотранспортным, коммунальным и санитарным организациям), а также местным административным органам.

В структуру гидролого-экологического мониторинга устьев рек могут, таким образом, входить следующие основные блоки: наблюдений; анализа, расчетов и прогнозов; информации; банк данных.

Главным в структуре мониторинга является, конечно, блок наблюдений. Он, в свою очередь, должен включать в себя прежде всего систему стационарных наблюдений — сеть постов, створов, станций, разрезов и т. д. На этой сети наблюдения ведутся в стандартные сроки и по программе, принятой в гидрометслужбе для наблюдения в устьях рек [32, 33]. Кроме того, в блок наблюдений входит система экспедиционных исследований, система дистанционных наблюдений, в частности, с применением аэро- и космических методов.

Хотя в полном виде концепция гидролого-экологического мониторинга устьев рек еще не разработана и система мониторинга не внедрена, его элементы (в первую очередь в части на-

блюдений) имеются во многих устьях рек России и сопредельных стран. Наилучшим образом контроль за состоянием гидролого-экологических условий организован в устьях рек Волги, Дона, Кубани, Дуная, Днепра, Даугавы, Сев. Двины.

Организация системы гидролого-экологического мониторинга — одна из первейших и важнейших задач в исследовании устьев рек России и сопредельных стран на ближайшую перспективу.

10.2. Методы расчета и прогноза гидрологических характеристик в устьях рек

Для количественной оценки упомянутых в разд. 8.2 связей для конкретных устьев рек возможно применение трех взаимно дополняющих друг друга подходов: 1) поиск эмпирических зависимостей по данным наблюдений; 2) использование гидродинамических моделей и моделей адвекции-дисперсии; 3) применение балансовых методов.

Эмпирические методы. Такие методы при наличии материалов наблюдений в устьях рек применяются в первую очередь; именно с помощью этих методов получены наиболее достоверные данные о гидролого-экологическом состоянии устьев рек и о его изменении.

Эмпирические методы заключаются в поиске на основе данных наблюдений зависимостей вида (8.1)—(8.12) в графической или аналитической форме [25, 27, 32—34].

Наиболее важны зависимости уровней и расходов воды в водотоках дельты (H_i , Q_i) от основных определяющих факторов — расхода воды реки в вершине устьевой области Q_p и уровня моря H_m . Такие зависимости обычно получают по данным наблюдений в виде графиков

$$H_i = f(Q_p, H_m), \quad (10.1)$$

$$Q_i = (Q_p, H_m). \quad (10.2)$$

Графики вида (10.1)—(10.2) позволяют оценить сезонные и кратковременные (связанные с колебаниями стока реки) изменения уровней и расходов воды в дельте. Площади заливания дельты зависят от уровней воды [32] и поэтому могут быть представлены эмпирическими зависимостями вида

$$F_{\text{зал}} = f(H_d, H_m) = \varphi(Q_p, H_m). \quad (10.3)$$

Изменение приливных или нагонных колебаний уровня воды на устьевом участке реки удобно представить зависимостями вида

$$\frac{\Delta H_x}{\Delta H_m} = \exp(-kx), \quad (10.4)$$

где ΔH_m — величина приливных или нагонных колебаний уровня воды в море, ΔH_x — то же на расстоянии x от моря, k — декремент затухания, обычно пропорциональный расходу воды в реке (рукаве) [25, 34] (см. разд. 2.5).

Соленость воды на устьевом взморье часто рассчитывают по эмпирическим зависимостям вида

$$S_j = f(Q_i, W), \quad (10.5)$$

где S_j — соленость воды в каком-либо районе устьевого взморья, Q_i — расход воды в ближайшем рукаве дельты, W — вектор скорости ветра над взморьем. Q_i и W берутся с некоторой заблаговременностью.

Наконец, дальность проникновения осолоненных вод в рукава дельты L_s определяют [48] по эмпирическим зависимостям вида

$$L_s = f(Q_i) \quad (10.6)$$

или

$$\frac{L_s}{h} = k (Fr_p)^{-n} \quad (10.7)$$

(см. разд. 3.2).

Смещение эмпирических графиков вида (10.1)—(10.7) от года к году указывает на многолетние изменения гидролого-экологических условий в устье реки, которые могут быть вызваны колебаниями фонового уровня моря, эрозионно-аккумулятивными процессами, динамикой русловой сети дельты и перераспределением стока между ее рукавами, гидротехническими мероприятиями и т. д. Выявленная направленность и интенсивность изменения гидролого-экологических характеристик и экстраполяция их на будущее позволяют давать приближенный прогноз состояния устья реки; такой способ прогноза называют *методом тенденции*.

Гидродинамические методы. Такие методы позволяют рассчитывать многие гидролого-экологические характеристики в устье реки с использованием ограниченной информации.

Наиболее разработаны методы расчета уровней и расходов воды в дельтах рек при квазиустановившемся режиме [25, 27, 34]. В основу таких методов положены уравнения одномерной гидравлики: уравнения движения воды для каждого звена русловой сети дельты, уравнения баланса воды в каждом узле русловой сети дельты, условия равенства падений уровня по разным направлениям в дельте. Система перечисленных урав-

нений решается либо аналитически (в случае отсутствия узлов слияния водотоков) [25, 34], либо методом итераций при более сложном строении русловой сети дельты [34]. В результате применения таких методов для каждого узла русловой сети дельты могут быть рассчитаны зависимости вида (10.1) и (10.2).

В работе [27] аналитический метод расчета распространен и на случай сложной русловой сети дельты с узлами слияния.

Более сложные методы, основанные на решении уравнений неустановившегося движения воды Сен-Венана, разработаны для расчета изменения уровней и расходов воды в устьях рек при приливах и нагонах [17, 22].

Методы расчета морфометрических характеристик водотоков дельт и тенденции их изменения основаны на использовании так называемых гидролого-морфометрических зависимостей, связывающих между собой характеристики динамически устойчивых русел [24, 25, 27, 34]. Направленность и интенсивность развития дельтовых водотоков определяется тем, в какую сторону и насколько фактические характеристики водотоков отличаются от «устойчивых» (см. разд. 5.4).

К гидродинамическим методам расчета могут быть отнесены и многочисленные модели качества воды, основанные на уравнениях адвекции—дисперсии и позволяющие рассчитывать пространственно-временную изменчивость солености воды или содержания в воде различных газов и загрязняющих веществ [10, 22, 48]. Эти методы весьма приближенны, так как требуют задания коэффициентов дисперсии, которые заранее часто неизвестны.

Упомянутые гидродинамические методы, к сожалению, не получили еще достаточно широкого распространения при изучении устьев рек и применялись лишь для отдельных элементов режима и отдельных участков устьев рек.

Балансовые методы. Эти методы используют уравнения баланса воды, наносов и солей и применяются для приближенных расчетов. Так, метод водного баланса применяется для расчета потерь (или, наоборот, добавления) стока в дельтах рек (разд. 2.8); метод баланса наносов позволяет рассчитывать изменения объема устьевого конуса выноса и интенсивность выдвигания дельты в море (разд. 4.4). Последний метод имеет большое значение для оценки крупномасштабных изменений дельт рек, особенно в случае значительной естественной или антропогенной трансформации стока наносов рек.

К балансовым методам расчета и прогноза гидрологических характеристик устья реки можно отнести и комплексную модель, разработанную для изучения изменчивости гидролого-экологических условий в устьях рек и рассмотренную в разд. 8.3.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Устьевая область реки как особый географический объект существует лишь до тех пор, пока происходят устьевые процессы, а они — пока действует речной сток и сохраняется принимающий его достаточно большой приемный водоем. Если исчезает хотя бы одно из этих условий, то перестает существовать и устьевая область реки. Так, резкое сокращение и прекращение речного стока влечет за собой затухание устьевых процессов, быструю деградацию устьевого природного комплекса и утрату устьевой областью своей специфичности.

Устьевая область реки — это открытая природная система, занимающая в иерархии природных систем промежуточное положение между двумя системами более высокого ранга — речным бассейном и приемным водоемом. В устье реки взаимодействуют две первичные водные массы — речная и морская — с совершенно разными физическими, химическими и биологическими свойствами. Все естественные и антропогенные изменения режима реки и приемного водоема через внешние границы устьевой области реки передаются внутрь устьевой системы. Кроме того, устьевая область реки функционирует и как самостоятельная и достаточно сложная система гидравлически и морфологически взаимосвязанных водотоков и водоемов. Эта система управляется специфическими устьевыми гидролого-морфологическими процессами. Естественные или антропогенные изменения любого звена этой системы передаются на всю устьевую систему.

Наиболее сильное воздействие на устьевую область реки оказывают антропогенные изменения речного стока воды, наносов, растворенных веществ. Изъятие и зарегулирование стока воды реки ведут к понижению уровней воды в дельте в период половодья, уменьшению заливания дельты, усилению относительного влияния приливов и нагонов на режим дельты, осолонению устьевого взморья, усилению проникновения осолоненных морских вод в водотоки дельты, деградации дельтового ландшафта. Антропогенное сокращение стока наносов реки влечет за собой усиление относительной роли волнения в формировании морского края дельты, его абразию и отступление дельты. Большую экологическую опасность для устьев рек представляет загрязнение речных вод. Благодаря замедлению скоростей течения и обратным течениям в устье реки создается

опасность задержки и накопления загрязняющих веществ. Искусственное углубление водотоков дельты и устьевых баров ведет к перераспределению стока по рукавам дельты и усилению проникновения осолоненных морских вод в углубленные водотоки.

Сильное воздействие на устья рек оказывают значительные естественные и антропогенные изменения уровня приемного водоема. Они могут изменить тип устьевой области реки и его местоположение, вызвать крупномасштабные эрозионно-аккумулятивные процессы.

Стратегия комплексного и рационального использования устьев рек, охраны их природных ресурсов и искусственного регулирования их режима должна строиться на трех уровнях: бассейновом (целенаправленное управление режимом речного стока), региональном (искусственное перераспределение стока в пределах дельты, распределение ее площади между конкурирующими отраслями хозяйства) и локальном (защита, выправление, регулирование отдельных участков гидрографической сети устья реки).

Для научного обоснования перечисленных мероприятий необходимо проведение широкомасштабных исследований устьевых областей рек. Эти исследования должны включать комплекс стационарных и экспедиционных работ, аэрокосмические наблюдения, разработку методов расчета и прогноза (в том числе долгосрочного) устьевых процессов, их математическое моделирование. Важным элементом таких исследований должен быть постоянно действующий гидролого-экологический мониторинг устьевых областей рек, осуществляющий слежение за быстрыми изменениями природного комплекса устьев рек и выявляющий их тенденции. Исследования устьев рек должны строиться на комплексной и междисциплинарной основе с привлечением специалистов разного профиля (гидрологов, океанологов, гидрохимиков, геоморфологов, гидробиологов, экологов).

ЛИТЕРАТУРА

1. Азимов С.А., Керимов А.А., Штейнман Б.С. Процессы дельтообразования рек западного побережья Каспийского моря и вопросы рационального использования природных ресурсов устьевых областей. Л.: Гидрометеоздат, 1986. 104 с.
2. Антонов В.С. Устьевая область реки Лены. Л.: Гидрометеоздат, 1967. 107 с.
3. Антонов В.С., Маслова Н.Г. Низовья и устье реки Оби. Л.: Гидрометеоздат, 1965. 82 с.
4. Байдин С.С. Сток и уровни дельты Волги. М.: Гидрометеоздат, 1962. 337 с.
5. Байдин С.С., Линберг Ф.Н., Самойлов И.В. Гидрология дельты Волги. Л.: Гидрометеоздат, 1956. 331 с.
6. Байдин С.С. и др. Гидрология устьевых областей рек Терека и Сулака / С.С. Байдин, Н.А. Скриптунов, Б.С. Штейнман, Г.Н. Ган. М.: Гидрометеоздат, 1971. 198 с.
7. Беляев И.П. Гидрология дельты Терека. М.: Гидрометеоздат, 1963. 208 с.
8. Богучарсков В.Т., Иванов А.А. Дельта Кубани. Ростов н/Д, 1979. 108 с.
9. Бутаков А.Н. Русловые процессы в устьях судоходных рек. М.: Транспорт, 1981. 104 с.
10. Гидродинамика береговой зоны и эстуариев / Под ред. А.Т. Иппена; Пер. с англ. Л.: Гидрометеоздат, 1970. 394 с.
11. Гидрология устьевой области Дуная / Под ред. Я.Д. Никифорова и К. Дьякону. М.: Гидрометеоздат, 1963. 383 с.
12. Гидрология устьевой области Куры / Под ред. И.П. Беляева. Л.: Гидрометеоздат, 1971. 323 с.
13. Гидрология устьевой области Невы / Под ред. С.С. Байдина. М.: Гидрометеоздат, 1965. 384 с.
14. Гидрология устьевой области Северной Двины / Под ред. М.И. Зотина и В.Н. Михайлова. М.: Гидрометеоздат, 1965. 376 с.
15. Дельты — модели для изучения / Под ред. М.А. Бруссар; Пер. с англ. М.: Недра, 1979. 323 с.
16. Днепровско-Бугская эстуарная экосистема / Под ред. Ю.П. Зайцева. Киев: Наукова думка, 1989. 237 с.
17. Дронкерс Й. Расчеты приливов в реках и прибрежных водах / Пер. с англ. Л.: Гидрометеоздат, 1967. 294 с.
18. Залогин Б.С., Родионов Н.А. Устьевые области рек СССР. М.: Мысль, 1969. 312 с.
19. Каспийское море. Гидрология устьев рек Терека и Сулака / Под ред. А.Н. Косарева и В.Н. Михайлова. М.: Наука, 1993. 160 с.

20. Коротаяев В. Н. Геоморфология речных дельт. М.: Изд-во МГУ, 1991. 224 с.
21. Костяницын М. Н. Гидрология устьевой области Днепра и Юж. Буга. М.: Гидрометеиздат, 1964. 335 с.
22. Мак-Доуэлл Д. М., О'Коннор Б. А. Гидравлика приливных устьев рек / Пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1983. 312 с.
23. Михайлов В. Н. Динамика потока и русла в непривливаемых устьях рек. М.: Гидрометеиздат, 1971. 260 с.
24. Михайлов В. Н. и др. Динамика гидрографической сети непривливаемых устьев рек / В. Н. Михайлов, М. М. Рогов, Т. А. Макарова, В. Ф. Полонский. М.: Гидрометеиздат, 1977. 294 с.
25. Михайлов В. Н., Рогов М. М., Чистяков А. А. Речные дельты. Гидролого-морфологические процессы. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 280 с.
26. Петреску И. Г. Дельта Дуная. Происхождение и развитие / Пер. с рум. М.: ИЛ, 1963. 279 с.
27. Полонский В. Ф., Лупачев Ю. В., Скриптунов Н. А. Гидролого-морфологические процессы в устьях рек и методы их расчета (прогноза). СПб.: Гидрометеиздат, 1992. 383 с.
28. Рогов М. М. Гидрология дельты Амурь. Л.: Гидрометеиздат, 1957. 255 с.
29. Рогов М. М., Ромашин В. В., Штейнбах Б. В. Гидрология устьевой области Западной Двины. М.: Гидрометеиздат, 1964. 349 с.
30. Рогов М. М., Ходкин С. С., Ревина С. К. Гидрология устьевой области Амурь. М.: Гидрометеиздат, 1968. 268 с.
31. Родионов Н. А. Гидрология устьевой области Дона. М.: Гидрометеиздат, 1958. 95 с.
32. Руководство по гидрологическим исследованиям в прибрежной зоне морей и в устьях рек при инженерных изысканиях. М.: Гидрометеиздат, 1972. 395 с.
33. Руководство по гидрологическому исследованию морских устьев рек. М.: Гидрометеиздат, 1965. 340 с.
34. Руководство по расчету элементов гидрологического режима в прибрежной зоне морей и в устьях рек при инженерных изысканиях. М.: Гидрометеиздат, 1973. 535 с.
35. Самойлов И. В. Устья рек. М.: Географгиз, 1952. 526 с.
36. Сафьянов Г. А. Эстуарии. М.: Мысль, 1987. 189 с.
37. Симов В. Г. Гидрология устьев рек Азовского моря. М.: Гидрометеиздат, 1989. 327 с.
38. Симонов А. И. Гидрология устьевой области Кубани. М.: Гидрометеиздат, 1958. 140 с.
39. Симонов А. И. Гидрология и гидрохимия устьевых взморья в морях без приливов. М.: Гидрометеиздат, 1969. 230 с.
40. Скриптунов Н. А. Гидрология предустьевых взморья Волги. М.: Гидрометеиздат, 1958. 144 с.

41. Тимченко В. М. Эколого-гидрологические исследования водоемов Северо-Западного Причерноморья. Киев: Наукова думка, 1990. 238 с.
42. Труды IV Всесоюзного гидрологического съезда. Т. 5. Гидрология озер, водохранилищ и устьев рек / Под ред. В. А. Знаменского. Л.: Гидрометеоиздат, 1975. 422 с.
43. Труды V Всесоюзного гидрологического съезда. Т. 9. Устья рек / Под ред. В. Н. Михайлова и В. В. Иванова. Л.: Гидрометеоиздат, 1990. 235 с.
44. Хублярян М. Г., Фролов А. П. Моделирование процессов интрузии в эстуариях и подземных водоносных горизонтах. М.: Наука, 1988. 143 с.
45. Чебанов М. С. Системный анализ водного и теплового режима дельтовых озер. Л.: Гидрометеоиздат, 1989. 159 с.
46. Coleman J. M., Prior D. B. Deltaic sand bodies // A 1980 Short Education Course. 1982. Note Series N 15. 171 p.
47. Dyer K. R. Coastal and estuarine sediment dynamics. New York: A Wiley-Interscience Publ., 1986. 324 p.
48. Guidelines on the study of seawater intrusion into rivers / Ed. by H. van der Tuin // Studies and reports in hydrology. N 50. Paris: UNESCO, 1991. 117 p.
49. Larras J. Embouchures, estuaires, lagunes et deltas. Paris, 1964. 117 p.
50. Mackay J. R. The Mackenzie delta area, N. W. T. Ottawa, 1963. 202 p.
51. Officer Ch. B. Physical oceanography of estuaries (and associated coastal waters). New York: A Wiley-Interscience Publ., 1976. 465 p.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Абразия 100
Аккумуляция наносов 106, 112
Активизация водотоков 104
Амплитуда прилива 52
- Базис эрозии 106
Баланс дельты водный 74
→ наносов 95
— тепловой 119
Бар береговой 99
— устьевой 113
Барр 56
Бор 56
Бороздина 32
- Вершина дельты 28
— устьевой области реки 26
Взморье устьевое 11, 19
— — открытое 19
— — отмелое 25
— — полузакрытое 19
— — приглубое 25
Водоем 11, 30, 34
— внутридельтовый 34
— дельтовый 34
— придельтовый 34
— приморский 35
Водоток боковой 32
— внутридельтовый 32
— главный 33
— магистральный 32
— основной 33
— транзитный 30
Волны обратные 51
— прямые 51
- Гидрофронт 81
Гирло 32
Граница устьевой области морская 28
- — — речная 26
Губа 19, 22
- Дальность распространения нагонов 64
— — осолоненных вод 88
— — приливов 52
Деградация дельты 147
Дельта 11, 18
— выдвигения 21
— выполнения 21
— наложенная 100, 101
— приречная 100
Деструкция вещества 139
- Ерик 32
- Зависимости гидролого-морфометрические 109
Загрязнение вод 127, 146, 147
Залив 19, 22
Заливание дельты 72
Затопление дельты 72
Заторы 121
Зона смещения 79
— фронтальная 81
- Изъятие стока 15, 71, 146
- Качество воды 127, 138
Кинематика волн в устьях рек 65
Конус выноса устьевой 18, 95
Коса устьевая 113
Коэффициент ветровой 42
— дисперсии 86, 87
— прилива 55
— трения ветра 37
— Шеши 38

- шероховатости 38
- Край дельты морской 21, 24, 116
- Критерии направленности русловых деформаций 110
- типа смещения 83, 85
- Лагуна 19, 22
- Ландшафт дельты 11, 12
- Лиман 19, 22
- Ложбина баровая 113
- Маскаре 56
- Мероприятия водохозяйственные 14, 149, 151
- Методы исследования 153
- прогноза 155
- расчета 155
- Модель функционирования устьевой экосистемы 135
- Модуль сопротивления 41
- Мониторинг гидролого-экологический 153
- Наводнения 74
- Нагоны 58
- Наносы взвешенные 90
- влекомые 91
- Область реки устьевая 10
- Осередок баровый 113
- Отмель баровая 113
- Отмирание дельтовых водотоков 104
- Охрана природных ресурсов 149
- Переуглубление абсолютное 47
- относительное 47
- Повышение уровня моря 98, 106
- Понижение уровня моря 99, 107
- Поророка 56
- Потери стока в дельтах 75
- Поток наносов вдольбереговой 94
- Приливы 51
- Припай 121
- Проникновение осолоненных вод в дельту 83
- Пространство предустьевое 28, 81
- Проток 32
- Процессы дельтообразования 98
- гидролого-морфологические 13
- гидролого-экологические 13
- русловые 105
- устьевые 12
- Разветвление дельтовых водотоков 33
- Раздел фронтальный 81
- Районирование устьев рек 26
- Распластывание волны половодья 48
- Распределение расходов воды по водотокам 69
- — наносов по водотокам 93
- Регулирование стока 15, 62, 71, 146
- Режим гидрохимический 123
- ледовый 120
- термический 118
- Риа 19, 22
- Рукав 32
- главный дельты 31
- Сеть дельты русловая 30
- устья гидрографическая 30
- Стоны 64
- Смена течений при нагонах 64
- — приливах 56
- Смешение речных и морских вод 79
- Соленость воды 79, 82, 86, 124, 141
- Сопряжение речного потока и приемного водоема 45
- Состав вод солевой 123
- Способность потока транспортирующая 90, 97
- Стадии развития рукавов 104
- формирования дельты 99
- Стратификация потока 44, 57, 83
- Струя речная на взморье 76, 77, 94

- Течения 38
 - ветровые 41
 - гравитационные 41
 - инерционные 40
 - плотностные 42
 - стоковые 76
- Типы дельт 17, 99
 - смещения речных и морских вод 83, 84
 - течений 38
 - устьев рек 20, 21
 - устьевых баров 115
 - — взморьев 19, 25
 - — участков рек 19
- Толщина льда 121
- Точка «нулевая» 58
- Трансформация биогенных веществ 126, 127, 138
 - приливной волны 55
- Углубление рукавов 71, 86
 - устьевых баров 86
- Удлинение устьевое 105
- Узлы разветвления 33
 - соединения 33
- Уравнение движения 37
 - неразрывности 37
 - русловых деформаций 97
 - смещения 124
 - состояния 37
- Условия устьев рек России гидролого-экологические 146
- Устойчивость устьевых экосистем 145
- Устье реки 10
- Участок реки нагонный 29
 - — придельтовый 28
 - — приливный 29
 - — приустьевой 28
 - — устьевой 11
- Уязвимость устьевых экосистем 145
- Фазы прилива 52
 - развития дельты 100
- Факторы устьевых процессов 13
 - — — антропогенные 14
 - — — природные 13
- Фиорд 19, 22
- Формула Ляхницкого 52
 - Шези 41
- Функционирование устьевых экосистем 131
- Характеристики гидролого-морфологические 110, 132
 - гидролого-экологические 133
- Циклы развития дельты 100, 101
- Циркуляция эстуарная 45, 56, 58, 84
- Число Ричардсона 85
 - Фруда плотностное 85
- Экосистема устья реки 129, 143
- Энергия волнения 94, 95
- Эпохи дельтообразования 99
- Эрозия 107, 112
- Эстуарий 18, 19
 - «обратный» 43, 89
- Этапы развития дельты 100, 101

ПРИЛОЖЕНИЕ

Основные гидрологические и морфометрические характеристики устьевых областей важнейших рек мира

Река	Государственная принадлежность устьевой области	Морфологический тип устьевой области	Площадь бассейна на реке, тыс. км ²	Длина реки, км	Площадь дельты, км ²	Средние на речной границе ²		Наибольшие величины приливов, м	Наибольшие начоны, м	Средняя соленость воды на морской границе, ‰	Длины участков ² , км				
						сток воды, км ³ /год	сток наносов, млн т/год				устьевого	приливного	нагонного	с ослоненными водами	дельтового
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1. Европа															
Волга	Россия, Казахстан	IV ³	1360	3530	11000	243 233	14,0 6,0	0,05	2,5	9-12	150		0		150
Дунай	Румыния, Украина	IV	817	2860	5640	203	<u>67,7</u> 42,2	0,1	1,0	16	200	200	200	20-30	115
Днепр	Украина	III	504	2200	350	53,0 43,3	<u>0,8</u>		0,7	14	$\frac{144^2}{106}$	$\frac{144^2}{106}$	28		47
Дон	Россия, Украина	III	422	1870	540	27,5 21,5	4,66 2,02		4,0	10	150		150	15	38
Сев. Двина	Россия	IV	357	744	900	108	4,4	1,3	1,9	26	135	135	135	45	45

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Печора	Россия	III	322	1810	3205	130	8,5	1,0	2,4	33	190	190	160	10	120
Нева	Россия	III	281	74	83	78,4	0,62	0,1	4,21		45		45	0	15
Урал	Казахстан	IV ³	237	2430	500	$\frac{7,0}{6,6}$	2,7	0,05	2,0	4-5	200		200	10	44
Рейн, Маас	Нидер- ланды	IV	224	1360		91,4	2,8	5,5	4,0	31			80		
Эльба	ФРГ	II	148	1110	0	26,3		2,5	5,7		155	155		70	0
Луара	Франция	II	120	1110	0	27,8		6,7		34,5	90	90		45	
Рона	Франция	IV	99,0	810	1680	55,0		0,2		37,5					
Даугава	Латвия	IV	87,9	1020		19,2	0,45	0,1	1,6	5	28		28	28	
Жиронда (с Гарон- ной и Дор- донью)	Франция	II	86,0	650	0	21,6	5,8	5,0		34				75	0
Эбро	Испания	IV	86,8	930	624	17,6									24
Сена	Франция	II	78,6	780	0	16,7		4,8		35	115	115		0	0
Мезень	Россия	II	78,0	966	0	24,4	0,8	8,5		24	50	50		0	0

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Кубань	Россия	IV	57,9	870	4190	$\frac{12,6}{9,5}$	$\frac{7,9}{0,84}$		3,45	11	116	100	15	116	
Онега	Россия	I	56,9	416	0	15,4	0,18	2,8	1,8	25	26	26	10	0	
Терек	Россия	IV ³	43,2	623	8900	$\frac{8,9}{8,4}$	$\frac{15,1}{11,9}$	0,05	1,2	4-5	170	0	0	170	
Северн	Велико- британия	II	21,0	390	0			7,0		35				0	
Темза	Велико- британия	II	15,3	405	0	3,08		5,0		34,5				0	
Сулак	Россия	IV ³	15,2	169	70	$\frac{4,4}{4,0}$	$\frac{13,2}{1,6}$	0,05	0,60	6-8	39	39	0	9,0	
2.Азия															
Обь	Россия	III	2990	3650	3250	402	13,0	0,7	3,0	3,0	350	51	350	0	144
Енисей	Россия	III	2580	3490	4500	597	$\frac{13,0}{4,9}$	0,7	3,0		870	445	870	196	
Лена	Россия	IV	2490	4400	32000	530	20,4	0,6			175			175	
Амур	Россия	II	1855	2820	0	355	23,0	2,2	2,0	30	270	270		48	0

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Чанцзян (Янцзы)	Китай	III	1800	5520	66700	995	480	4,6		31	600	600			
Ганг, Брахмапутра, Мегхна	Бангладеш, Индия	IV	1730	3000	105600	1230	1670	5,9	13,7	31				88	
Инда	Пакистан	IV	960	3180	29520	94	435	8,4		36					
Меконг	Вьетнам, Камбоджа	IV	810	4500	93780	504	120	3,5		32	390	390		42	300
Хуанхэ	Китай	IV	745	4670	36270	54	1640	2,3		30					
Колыма	Россия	IV	647	2130	3250	122	8,2	0,1	2,5		282		282		120
Иравади	Мьянма	IV	410	2300	20570	486	300	3,0	4,6	31	250	250		70	
Инди-гирка	Россия	IV	360	1726	5000	54,2	11,2	0,3	2,0	24	200		200		130
Аму-дарья	Узбекистан	IV ³	309	1415	9000	45,8 4,0	135	0,05	1,0	10 30	250		25		250
Яна	Россия	IV	238	872	6600	32,4	3,0	0,2	1,5		140	30	70	60	140
Анадырь	Россия	II	191	1150	0	67,9	3,6	2,5	1,8	32	185	185	185	80	0
Кура	Азербайджан	IV ³	188	1360	204	17,8 15,5	39,7 17,1	0,05	1,0	11...12	35		35	27	23

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Красная (Хонгха)	Вьетнам	IV	145	1200	15640	135	97,1	2,0		32	180	180		24	160
Или	Казахстан	IV ³	140	1439	8200	14,8 11,6	14,0 3,3			1	120				120
Пенжина	Россия	II	73,5	713	0	24,8	1,0	13,4		32					0
Камчатка	Россия	IV	55,9	758		32,6	3,1	1,0		32	12	10	12	2	
3. Африка															
Конго	Заир, Ангола	IV	3820	4370	2072	1414	72	1,7		33					160
Нил	Египет	IV	2870	6670	12500	73,1	62	0,5		39					
Нигер	Нигерия	IV	2090	4160	19130	270	21	1,7		31	145	145			
Замбези	Мозамбик	IV	1330	2660	7150	160		4,0		35					
Сенегал	Сенегал, Мавритания	IV	441	1430	4250	22,9		2,0		35,5	450	450		300	
Гамбия	Гамбия	II	180	1200	0			1,7		35					0
4. Северная Америка															
Миссисипи	США	IV	3212	6260	26160	542	300	0,6	3,7	31	500	400	500	240	300

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Маккензи	Канада	IV	1800	4240	8500	350		0,4		27					
Св. Лаврентия	Канада	II	1290	3060	0	439		4,6		30					0
Юкон	США	IV	932	3700	5802	161		1,2		30					0
Колумбия	США	II	669	1950	0	267		3,3		32					0
Фрейзер	Канада	II	220	1100	0	112		4,7		32				30	0
5. Южная Америка															
Амазонка	Бразилия	III	6915	6280	100000	6300		4,3		32	1400	1400			350
Ла-Плата (с Параной и Уругваем)	Аргентина, Уругвай	III	3100	4700	5400	725		1,0		32					
Ориноко	Венесуэла	IV	1000	2740	24550	914		2,9		32					200
Токантинс	Бразилия	II	700	1609	0	324		4,0		32					0

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Сан-Франсиску	Бразилия	IV	600	2800		94		2,5		36,5					
Магдалена	Колумбия	IV	260	1530	2460			0,6		36					
6. Австралия															
Муррей (Марри)	Австралия	II	1060	3490	0	23,6		2,8		35,5					0

Примечания.

¹ Морфологическая типизация устьевых областей дана согласно табл. 1.

² В случае дробных цифр: в числителе — при естественном режиме, в знаменателе — после существенного антропогенного изменения режима.

³ Озерные устьевые области.

Незаполненные клетки означают отсутствие данных.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Глава 1. Устьевая область реки как особый географический объект	10
1.1. Определение устьевой области реки. Устьевые процессы и факторы, их определяющие	10
1.2. Типизация устьевых областей рек	15
1.3. Районирование устьевых областей рек	26
1.4. Гидрографическая сеть устья реки	30
Глава 2. Динамика вод в устьях рек	36
2.1. Основные особенности динамики вод в устьях рек	36
2.2. Типы течений в устьях рек	38
2.3. Вертикальная неоднородность потока в устьях рек	42
2.4. Сопряжение речного потока и приемного водоема при отсутствии приливов и нагонов	45
2.5. Сопряжение речного потока и приемного водоема при неустановившемся движении воды	51
2.6. Кинематика прямых и обратных волн в устье реки	65
2.7. Распределение и перераспределение стока воды по рукавам дельт	69
2.8. Затопление дельт	72
2.9. Водный баланс дельт	74
2.10. Течения на устьевом взморье	76
Глава 3. Смешение речных и морских вод в устьях рек	79
3.1. Устьевая зона смешения	79
3.2. Проникновение осолоненных вод на устьевой участок реки и в эстуарий	83
Глава 4. Динамика наносов в устьях рек	90
4.1. Основные особенности динамики наносов в устьях рек	90
4.2. Движение наносов на устьевом участке реки и в эстуарии	92
4.3. Движение наносов на открытом устьевом взморье	94
4.4. Баланс наносов в устьях рек	95
Глава 5. Морфологические (эрозионно-аккумулятивные) процессы в устьях рек	97
5.1. Основные особенности морфологических процессов в устьях рек	97
5.2. Процессы дельтообразования	98
5.3. Динамика русловой сети дельты	104
5.4. Русловые процессы в устьях рек	105
5.5. Динамика устьевых баров	113
5.6. Динамика морского края дельт	116
Глава 6. Термический и ледовый режим устьев рек	118
6.1. Термический режим	118
6.2. Ледовый режим	120
Глава 7. Гидрохимический режим устьев рек	123
Глава 8. Экологические условия устьев рек	129
8.1. Устьевые экосистемы, их структура и характеристики	129

8.2. Основные закономерности функционирования устьевых экосистем	131
8.3. Комплексная модель для расчета изменения гидролого-экологических характеристик устьев рек	135
8.4. Концепция устойчивости и уязвимости устьевых экосистем	143
8.5. Современное состояние гидролого-экологических условий устьев рек России и сопредельных стран и тенденции их изменения	146
Глава 9. Водохозяйственные проблемы устьев рек и научные основы рационального использования и охраны их природных ресурсов	149
Глава 10. Методы исследования устьев рек	153
10.1. Наблюдения в устьях рек и научные основы их гидролого-экологического мониторинга	153
10.2. Методы расчета и прогноза гидрологических характеристик в устьях рек	155
Заключение	158
Литература	160
Предметный указатель	163
Приложение	166

CONTENTS

Introduction	3
Chapter 1. River mouth area as particular geographical object	10
1.1. Definition of a river mouth area. Mouth processes and governing factors	10
1.2. Division of river mouth areas into types	15
1.3. Division of river mouth areas into districts	26
1.4. Hydrographic network of a river mouth	30
Chapter 2. Water dynamics at river mouths	36
2.1. Principal features of water dynamics at river mouths	36
2.2. Types of currents at river mouths	38
2.3. Vertical irregularity of flow at river mouths	42
2.4. Conjugation of river flow and receiving basin in the absence of tides and storm surges	45
2.5. Conjugation of river flow and receiving basin at unsteady water motion	51
2.6. Kinematics of forward and reverse waves at a river mouth	65

2.7. Distribution and redistribution of water flow between delta branches	69
2.8. Inundation of the deltas	72
2.9. Water balance in the deltas	74
2.10. Currents at the mouth nearshore	76
Chapter 3. Mixing of river and sea waters at river mouths	79
3.1. Mouth mixing zone	79
3.2. Saltwater intrusion into the river part of the mouth and estuary	83
Chapter 4. Sediment dynamics at river mouths	90
4.1. Principal features of sediment dynamics at river mouths	90
4.2. Sediment motion in river part of the mouth and estuary	92
4.3. Sediment motion at the mouth nearshore	94
4.4. Sediment balance at river mouths	95
Chapter 5. Morphological processes (erosion and accumulation) at river mouths	97
5.1. Principal features of morphological processes at river mouths	97
5.2. Delta formation processes	98
5.3. Dynamics of the delta channel network	104
5.4. Channel processes at river mouths	105
5.5. Dynamics of river mouth bars	113
5.6. Dynamics of the delta coastline	116
Chapter 6. Thermal and ice regime of river mouths	118
6.1. Thermal regime	118
6.2. Ice regime	120
Chapter 7. Hydrochemical regime of river mouths	123
Chapter 8. Ecological conditions of river mouths	129
8.1. Mouth ecosystems, their structure and characteristics	129
8.2. Principal regularities of mouth ecosystem functioning	131
8.3. Complex model for computation of changes in hydrological-ecological characteristics of river mouths	135
8.4. Concept of stability and vulnerability of mouth ecosystems	143
8.5. Modern state of hydrological-ecological conditions of river mouths in Russia and adjacent countries and tendency of their changes	146
Chapter 9. Water management problems of river mouths and scientific bases of rational use and protection of their natural resources	149
Chapter 10. Methods of investigation of river mouths	153
10.1. Observations at river mouths and scientific bases of their hydrological-ecological monitoring	153
10.2. Methods of computation and prediction of hydrological characteristics at river mouths	155
Conclusion	158
References	160
Index	163
Appendix	166

Учебное издание

Михайлов Вадим Николаевич
ГИДРОЛОГИЯ УСТЬЕВ РЕК

Зав. редакцией *И. И. Щехура*
Редактор *Л. М. Батыгина*
Технический редактор *Г. Д. Колоскова*
Корректоры: *Н. И. Коновалова, Н. В. Иванова*

Изд. лиц. № 040414 от 18.04.97 г.

Подписано в печать 15.07.98. Формат 60×90/16.
Бумага офс. Гарнитура Таймс. Офсетная печать.
Усл. печ. л. 11,0. Уч.-изд. л. 10,53.
Тираж 1000 экз. Изд. № 6392.
Зак. 5511

Ордена «Знак Почета»
Издательство Московского университета.
103009, Москва, ул. Б. Никитская, 5/7.
Отпечатано
в Производственно-издательском комбинате ВИНТИ
140010, Люберцы, Октябрьский пр. 403.
Тел. 554-21-86