

ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ  
И РЕЖИМ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

УДК 556.54(282.253.263:267.64)

ОСОБЕННОСТИ ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА  
И МОРФОЛОГИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ ДЕЛЬТЫ р. ГОДАВАРИ (ИНДИЯ)<sup>1</sup>

© 2011 г. В. Н. Михайлов

\*Московский государственный университет  
119991 Москва ГСП-1, Ленинские горы

Поступила в редакцию 01.09.2010 г.

Рассмотрены основные гидролого-географические характеристики р. Годавари и прибрежной зоны Бенгальского зал., влияющие на гидрологический режим и морфологическое строение дельты реки. Описаны гидрографические, климатические и экологические условия дельты р. Годавари. Подробно рассмотрены особенности гидрологических процессов в дельте, в том числе смешения вод реки и залива, воздействия на дельту тропических штормов и ураганов. Выявлены основные черты морфологических процессов в дельте: циклические изменения дельты в голоцене, динамики русловой сети и морского края дельты в последние 150 лет. Показано, что во второй половине XX в. усилились процессы размыва и отступания морского берега дельты.

*Ключевые слова:* река, море, дельта, гидрологический режим, дельтообразование, штормовые нагоны.

Гидрологические и морфологические процессы в густонаселенной дельте р. Годавари изучены пока недостаточно. В отечественной литературе сведения об устьевой области р. Годавари, включая ее дельту, практически отсутствуют. Между тем, для российских научных работников, занимающихся проблемами гидрологии и водных ресурсов, характеристика гидролого-морфологических процессов в дельте Годавари может представлять не только общегеографический, но и специальный интерес, обусловленный особенностями быстро изменяющейся дельты, подверженной сильному влиянию муссонных колебаний стока реки, приливов, тропических штормов и ураганов, волновому размыву. Автор поставил перед собой цель рассмотреть основные черты современных гидрологических и морфологических процессов в дельте р. Годавари с учетом результатов недавних исследований, проведенных индийскими учеными [9, 11, 16, 21, 22, 28–31], и положений российской школы в изучении устьев рек.

ГЕОГРАФО-ГИДРОЛОГИЧЕСКАЯ  
ХАРАКТЕРИСТИКА БАССЕЙНА  
р. ГОДАВАРИ

*Гидрография и рельеф*

Годавари — вторая после Ганга река Индии по площади бассейна, длине и водоносности. Протекает с запада на восток поперек п-ова Индостан через индийские штаты Махараштра и Андхра-Пра-

деш. Истоки реки находятся в горах Западные Гаты в 75 км от побережья Аравийского моря на высоте 1067 м [28]. Годавари далее течет через террасированное Деканское плоскогорье. При пересечении гор Восточные Гаты Годавари протекает между крутыми обрывистыми берегами. Ширина русла уменьшается до 180 м в самом узком месте — теснине под названием “Горло”. Здесь река прорывается между залесенными холмами, обрывающимися к водному потоку почти вертикальными склонами [18]. Ниже по течению р. Годавари выходит на широкую прибрежную равнину. Русло расширяется и формирует низменные острова.

При впадении в Бенгальский зал. Индийского океана р. Годавари образует особый географический объект — устьевую область (УО) (рис. 1). УО р. Годавари относится к дельтово-эстуарному типу и состоит из трех частей: дельты, объектов эстуарного типа в приморской части дельты (залива-лагуны Какинада и нижних участков северных рукавов, куда проникают воды залива) и открытого устьевого взморья (прибрежной части шельфа Бенгальского зал.). Главный элемент УО р. Годавари — крупная микроприливная сложноразветвленная дельта, состоящая из рукавов и протоков и дельтовой равнины.

Согласно большинству недавних источников [10, 18, 19, 21, 28] длина р. Годавари — 1465 км, площадь бассейна — 313 тыс. км<sup>2</sup>. В литературе встречаются и иные сведения: длина — 1400 [24], 1500 [4], 1530 км [29], площадь бассейна — 305 [14], 310 [24], 312 [15], 314 тыс. км<sup>2</sup> [4]. Основные притоки реки —

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 11-05-00199).

Пурна, Вардха, Индравари, Силеру (левые), Манджера (правый).

### Климат

Климат бассейна р. Годавари субэкваториальный муссонный. Среднегодовое количество осадков воздуха высокая – 25–27°C. Годовая сумма осадков для бассейна реки по разным данным составляет 1100 [13], 1110 [4] 1512 мм [14] (последняя цифра явно завышена).

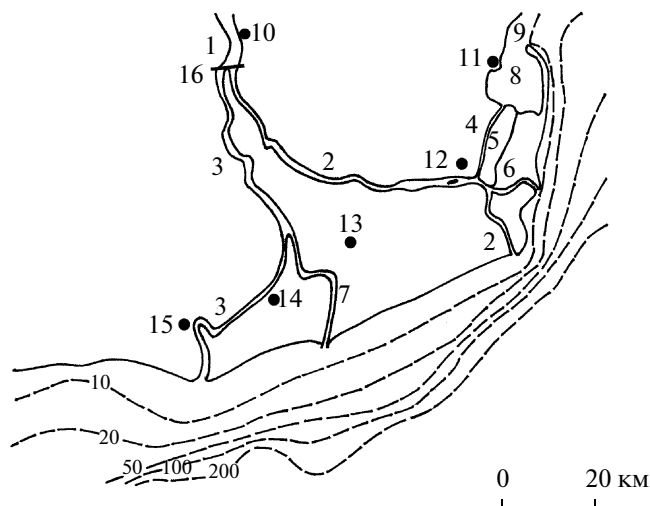
Согласно более новым данным [27] средняя сумма осадков в бассейне Годавари за 1951–1990 гг. равна ~1086 мм, при этом ~85% осадков (923 мм) приходится на период юго-западного муссона с июня по сентябрь. Осадки за период этого муссона наименьшие на западе бассейна (<600 мм) и наибольшие – на северо-востоке (до 1100 мм). Межгодовая изменчивость осадков в период муссона довольно велика – от 643 (1974 г.) до 1221 мм (1959 г.). Большая многолетняя изменчивость осадков приводит к частому чередованию сильных наводнений и суровых засух.

Согласно [4] среднегодовые величины испарения и испаряемости в бассейне Годавари равны 760 и 1750 мм соответственно. Отношение средних величин испаряемости и осадков (1750 и ~1100 мм), т.е. индекс сухости по М.И. Будыко, составит ~1.6, что свидетельствует о том, что бассейн реки находится в области недостаточного увлажнения, когда индекс сухости равен от 1.0 до 3.0.

### Гидрологический режим реки

Муссонный характер атмосферных осадков предопределяет и крайне неравномерный режим водного стока реки.

Среднегодовой водный баланс бассейна р. Годавари по [4] при принятой площади бассейна 314 тыс. км<sup>2</sup> следующий: осадки 1110 мм (348 км<sup>3</sup>), сток 350 мм (110 км<sup>3</sup>). На долю испарения, таким



**Рис. 1.** Карта-схема дельты и устьевое шельфа р. Годавари по [11, 28]. 1 – р. Годавари; рукава: 2 – Гаутами, 3 – Васишта, 4 – Коранги, 5 – Галеру, 6 – Нилареву, 7 – Вайнатям; 8 – зал. Какинада; 9 – коса Какинада; города и населенные пункты: 10 – Раджамантри, 11 – Какинада, 12 – Янам, 13 – Амалапурам, 14 – Разоле, 15 – Нарасапур; 16 – барраж Довлайсварам. Изобаты на устьевом взморье в метрах.

образом, приходится 760 мм (238 км<sup>3</sup>). Коэффициент стока равен 0.32.

По данным различных источников сток воды в устье Годавари составляет 92 км<sup>3</sup>/год [18, 23], 97 [15], 100 [14], 110 [4]. Согласно [24] в результате увеличения забора воды на орошение водный сток реки сократился с 100 до 92 км<sup>3</sup>/год.

Автором статьи обработан опубликованный в [20] ряд наблюдений за расходами воды р. Годавари на гидрологическом посту (г/п) Полаварам, находящемся в 30 км выше вершины дельты (ВД) (табл. 1). Данные по этому г/п характеризуют практически весь сток реки (площадь бассейна выше этого г/п

**Таблица 1.** Внутригодовое распределение среднемесячных  $Q_{\text{ср}}$ , средних максимальных  $Q_{\text{max}}$  и минимальных  $Q_{\text{min}}$  расходов воды р. Годавари на г/п Полаварам за 1901–1979 гг. по [20] (в скобках – годы)

Характеристика	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
$Q_{\text{ср}}$ , м <sup>3</sup> /с	263	225	170	130	97.3	1055	7319	11600	9637	3835	1036	428
$Q_{\text{ср}}$ , %	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	3.0	20.4	32.4	26.9	10.7	2.9	1.2
$Q_{\text{max}}$ , м <sup>3</sup> /с	461	543	424	698	286	7576	34600	26480	32730	14990	4138	1794
	(1934)	(1974)	(1964)	(1937)	(1937)	(1963)	(1907)	(1959)	(1959)	(1931)	(1916)	(1948)
$Q_{\text{min}}$ , м <sup>3</sup> /с	32	69	55	27	7.0	37	192	2308	1789	732	229	140
	(1961)	(1906)	(1906)	(1903)	(1936)	(1902)	(1911)	(1902)	(1970)	(1920)	(1913)	(1912)

равна 299 тыс. км<sup>2</sup>, что составляет ~96% полной площади бассейна реки).

Среднегодовое количество расхода и стока воды на г/п Полаварам оказались равными 2983 м<sup>3</sup>/с и 94.1 км<sup>3</sup>/год. Последняя цифра близка к данным, приведенным в [15] для этого же поста (~97 км<sup>3</sup>/год).

Межгодовая изменчивость водного стока р. Годавари довольно велика. За 1901–1979 гг. наибольшие среднегодовые расходы воды отмечались в 1959 (6666), 1906 (5187) и 1917 гг. (4933 м<sup>3</sup>/с), наименьшие – в 1920 (873), 1902 (1275) и 1914 гг. (1284 м<sup>3</sup>/с). Вместе с тем, заметной тенденции к уменьшению стока (несмотря на упоминающийся в литературе возросший водозабор на орошение) не выявлено. Более того, в [28] приведена величина стока воды реки за 1988–2003 гг., равная 96.5 км<sup>3</sup>/год, т.е. на 2.4 км<sup>3</sup> (2.5%) больше, чем за 1901–1979 гг. Это может свидетельствовать либо о не столь большом влиянии водозабора на сток реки, как иногда полагают, либо о проявившейся в конце XX–начале XXI вв. тенденции к увеличению осадков и, как следствие, стока в бассейне реки.

Как показывают данные табл. 1, внутригодовое распределение водного стока р. Годавари крайне неравномерно. На четыре самые многоводные месяца в период летнего муссона (июль–октябрь) приходится 90.4% годового водного стока, а на остальную часть года – всего 9.6%. Самые многоводные месяцы – август (32.4%) и сентябрь (26.9% годового стока), самые маловодные – май (0.3), апрель (0.4) и март (0.5% годового стока). Водный сток самого многоводного месяца превышает сток самого маловодного почти в 110 раз.

Максимальные расходы воды р. Годавари в ВД в июле–сентябре могут превышать 50 тыс. м<sup>3</sup>/с. В это время в низовьях и дельте реки возможны сильные наводнения. В сухой сезон (обычно в апреле–июне) расходы воды могут уменьшиться до 10–20 м<sup>3</sup>/с.

Р. Годавари относится к группе рек, которые в условиях изменения климата в XXI в. будут увеличивать свой водный сток. Согласно расчетам по ансамблю из 12 климатических сценариев сток реки может возрасти на 10–15%, причем в основном в период влажного летнего муссона. В связи с ожидаемым увеличением количества атмосферных осадков в августе–сентябре ежедневные расходы воды в районе г/п Полаварам могут возрасти до 120000 и даже – 200000 м<sup>3</sup>/с [17]. Такие максимальные расходы приведут к катастрофическим наводнениям, поскольку расходы >80 тыс. м<sup>3</sup>/с вызывают сильное затопление обширных площадей в низовьях реки, что наносит большой ущерб населению и хозяйству. В районе Полаварам на реке предполагается соорудить новый барраж. В [17] указано, что этот барраж не только не уменьшит опасность затопления земель во время половодья, но может его усугубить,

причем как ниже, так и выше по течению от сооружения.

Первые данные о стоке взвешенных наносов в устье р. Годавари (на г/п Полаварам), основанные на данных наблюдений, приведены в [10]. За 1969–1980 гг. средняя величина стока взвешенных наносов  $W_R$  оказалась равной 170 млн. т/год. При средней величине водного стока за этот же период 92 км<sup>3</sup>/год средняя мутность воды  $s$  составила 1.85 кг/м<sup>3</sup>. Тренда в многолетних изменениях  $W_R$  и  $s$  не обнаружено, но выявлена большая межгодовая изменчивость и  $W_R$  (от 44 до 272 млн. т/год) и  $s$  (от 1.07 до 2.47 кг/м<sup>3</sup>). Величина стока взвешенных наносов р. Годавари 170 млн. т/год повторена в обобщающих работах [23, 24]. Такой большой сток наносов объясняется повышенной размываемостью грунтов в бассейне реки (особенно в его средней и нижней частях) [10] и усилением эрозии почв в бассейне, вызванной массовой вырубкой лесов, особенно интенсивной после 1874 г., когда правительство страны дало разрешение местному населению использовать под сельское хозяйство залежные земли [28]. По данным [10] Годавари – одна из крупных рек мира с наибольшей величиной модуля стока взвешенных наносов (555 т/(км<sup>2</sup> год)).

Сток взвешенных наносов в последние десятилетия заметно уменьшился. Согласно [21] величина  $W_R$  на г/п Полаварам выше ВД за 1971–1998 гг. составила в среднем 97.5 млн. т/год. При этом отмечена большая межгодовая изменчивость  $W_R$  (от 19.5 в 1987 до 271.7 млн. т в 1976 г.). Осреднение величин  $W_R$  за отдельные периоды выявило постепенное их уменьшение. В 1971–1979 гг.  $W_R$  был равен 145.3, в 1980–1989 гг. – 87.4 и в 1990–1998 гг. – 56.8 млн. т/год. В [21] уменьшение стока наносов Годавари объясняется сооружением на притоках реки многочисленных плотин и водохранилищ, задерживающих речные наносы.

#### *Природные ресурсы и их использование*

К числу основных природных ресурсов бассейна р. Годавари относятся леса, плодородные почвы, водные ресурсы. На плоскогорье преобладают саванны и редколесья, на более возвышенных местах – листопадные муссонные леса, вблизи устья реки – влажные тропические леса. В низовьях реки выращивают рис, на островах реки – табак.

Водные ресурсы бассейна р. Годавари широко используются для орошения земель. В бассейне построено большое количество низконапорных плотин – барражей, основное назначение которых – создание подпора для подачи речной воды на орошение земель и водоснабжение населенных пунктов.

По [18, 19, 28] в верхнем течении реки сооружен наиболее крупный барраж у г. Гангапур (“Город на

реке”), который обеспечивает питьевой водой г. Насик и крупную тепловую электростанцию. В среднем течении находятся барраж около г. Низамабад, подающий воду для орошения земель в четырех округах штата Андхра-Прадеш, и барраж с самой крупной земляной плотиной в Индии (его основное назначение — подача воды в левые и правые оросительные каналы в округе Нандер). Непосредственно выше г. Раджамандри вблизи ВД Годавари находится крупный барраж с ГЭС, построенный в 1948 г. Его основное назначение — орошение земель. Немного ниже г. Раджамандри и ВД еще в 1852 г. английским инженером Артуром Конноном был сооружен знаменитый барраж Довлайсварам. Его назначение — подача воды в густую сеть оросительных каналов, среди которых — крупный канал Элуру, идущий на юго-запад в сторону дельты р. Кришна. В 1987 г. во время половодья барраж был поврежден, но в том же году и барраж, и шоссе, связывающая округа Восточная и Западная Годавари, были реконструированы.

Через р. Годавари построено три железнодорожных моста. Первый из них, длиной 3 км, был сооружен еще в 1897 г. для обслуживания перевозки грузов между Мадрасом и Калькуттой [19].

Река, ее притоки и многие оросительные каналы используются для местного судоходства. В г. Какинада находится морской порт.

Согласно отчету Министерства водных ресурсов Индии, цитируемому в [21], полезный объем всех водохранилищ в бассейне Годавари за период независимости страны возрос с 1.6 до 19.5 км<sup>3</sup>, а в ближайшем будущем может увеличиться еще на 18.8 км<sup>3</sup>.

## ГЕОГРАФО-ГИДРОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЫ БЕНГАЛЬСКОГО ЗАЛИВА

### *Рельеф и донные отложения*

Устьевое взморье р. Годавари представляет собой прибрежную часть шельфа Бенгальского зал. Индийского океана.

Современный шельф, прилегающий к морскому краю дельты (МКД) Годавари, довольно узок (рис. 1, 2). В районе устья южного рук. Васишта его ширина составляет ~15 км, глубина на бровке шельфа ~20 м. Против средней части МКД Годавари ширина шельфа также равна ~15 км, а глубина на его бровке ~30 м. Против устья северного рук. Гаутами шельф еще уже (5–6 км), глубина на его бровке ~20 м. Уклоны дна на шельфе против южной и средней частей МКД составляют 1.3–2.0‰, против северной части ~4–5‰. Взморье с такими уклонами (>1‰) считается очень приглубым [5].

Мористее бровки шельфа начинается очень крутой материковый склон (рис. 2) с уклонами дна на

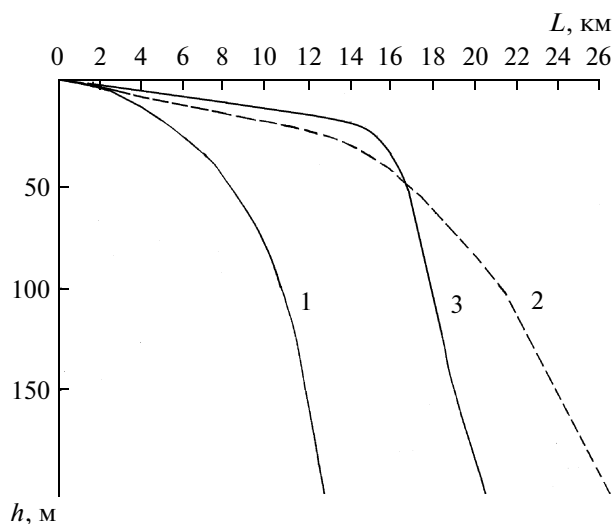


Рис. 2. Профили дна устьевого шельфа против северной (1), центральной (2) и южной (3) частей дельты Годавари.

глубинах >30 м, равными 10–20‰, а местами — и до 50‰.

Поверхность современного шельфа подстилают мощные слои ила и песка — в прошлом выносы рек Годавари и Кришна [9]. Верхняя часть аккумулятивной толщи сформировалась во время голоценовой трансгрессии океана, когда здесь накапливались отложения шельфа (шельфовая дельта) или бровки шельфа (дельта края шельфа) (в английской терминологии shelf delta и shelf-edge delta соответственно).

Выдвижение конуса выноса в сторону моря приводило к перемещению в этом же направлении бровки шельфа и формированию крутого материкового склона [9].

В современных поверхностных отложениях устьевого взморья Годавари хорошо выражена зональность [8]. Ближайшая к берегу зона представлена отложениями песка, крупность которого уменьшается в сторону залива. Во второй зоне преобладают отложения песка и ила, в третьей — песок и ракушка. Отложения материкового склона составляют пластичные глины.

### *Климатические и гидрологические условия*

Климатические и зависящие от них гидрологические условия прибрежной зоны во многом определяются муссонным режимом циркуляции атмосферы. Над Бенгальским зал. в мае–сентябре господствует муссон юго-западный летний океанический, а в декабре–феврале — северо-восточный зимний континентальный [8]. Период март–апрель часто называют предмуссонным, а октябрь–ноябрь — постемуссонным.

Температура воздуха над прибрежной зоной в течение года изменяется мало. Минимальные среднемесячные температуры ( $\sim 24^\circ\text{C}$ ) отмечаются в декабре–феврале, максимальные ( $\sim 30^\circ\text{C}$ ) – в мае–июне.

Скорости ветра в период летнего муссона заметно больше, чем при зимнем муссоне.

Сезонные изменения ветра создают в заливе вблизи МКД Годавари устойчивую разнонаправленную циркуляцию вод в поверхностном слое. Во время летнего муссона вдольбереговые течения со скоростями 0.5–0.8 м/с направлены преимущественно на северо-восток, а во время зимнего муссона со скоростями 0.3–0.5 м/с – на юго-запад [8].

В период летнего муссона совместное действие вдольбереговых течений и силы Кориолиса вызывает у берегов небольшой сгон поверхностных вод, понижение уровня воды и подъем глубинных вод. В этот период в прибрежных водах повышается содержание растворенных фосфора и силикатов и уменьшается – кислорода, начинается бурное развитие фито- и зоопланктона. Во время зимнего муссона у берегов, наоборот, создается нагон поверхностных вод. В итоге, у побережья дельты Годавари возникают значительные сезонные колебания уровня воды, достигающие  $\sim 45$  см [8].

Помимо сезонных изменений уровня, важную роль в режиме прибрежной зоны играют штормовые нагоны, вызванные тропическими циклонами и ураганами (о них будет сказано ниже), и приливы. Вдоль побережья штата Андхра-Прадеш величина приливов возрастает по направлению к вершине Бенгальского зал. В порту Вишакхапатам (к северу от дельты Годавари) полусуточные приливы имеют величину  $\sim 1.7$  м в сизигию и  $\sim 0.9$  м в квадратуру [8]. По данным [14] средняя величина приливов вблизи дельты равна 1.2 м. В зал. Какинада средняя величина приливов – 0.5 м, а скорость приливных течений не превышает 2.0 м/с [31]. Приливные течения в прибрежной зоне не превышают 0.5 м/с, однако в отливную фазу в период половодья вблизи устьев рукавов могут достигать 2.0 м/с [31].

В многолетних изменениях уровня в Бенгальском зал. в последние десятилетия отмечен небольшой положительный тренд. Как и во всем Мировом океане, в заливе возможно ускорение повышения среднего уровня, связанное с общим потеплением климата [12]. В зал. Какинада выявлено воздействие на рост уровня местной просадки грунта.

Ветер создает в прибрежной зоне волнение, наиболее сильное во время летнего юго-западного муссона. Средняя и максимальная высота волн по [2] составляет соответственно 1.0 и 5.0 м в феврале и 1.25 и 7.5 м в августе.

Более новые сведения о волнении в прибрежной зоне содержатся в [31]. По данным за 1968–1986 гг. в режиме волнения выделены не два, а три периода: юго-восточного муссона с июня по сентябрь (средняя и максимальная высота волн  $h_b$  составляет  $\sim 2.0$

и 4.0 м соответственно), северо-восточного муссона с октября по январь ( $\sim 1.0$  и 4.5 м), период “спокойной погоды” с февраля по май ( $\sim 1.0$  и 2.5 м). Согласно [31] с марта по сентябрь волны подходят к берегу в основном с юго-востока и юга, а в остальную часть года – с северо-востока и востока-юго-востока.

Создаваемый течениями и волнением вдольбереговой поток наносов направлен на северо-восток с марта по октябрь и на юго-запад в остальную часть года. Поскольку и течения и волнение наиболее сильны в период юго-западного муссона, результирующий поток наносов, воздействующий на береговые аккумулятивные формы рельефа, направлен вдоль берега на северо-восток [8, 31]. Однако в [21] указано, что на некоторых участках МКД Годавари результирующий вдольбереговой поток наносов может быть ориентирован и в противоположном направлении – на юго-запад.

Диапазон изменения среднемесячной температуры воды в прибрежной зоне невелик –  $\sim 6^\circ\text{C}$ . Эта температура наименьшая – в январе–феврале ( $24^\circ\text{C}$ ), наибольшая – в мае ( $\sim 30^\circ\text{C}$ ). Интересно отметить, что с августа по апрель температура воды на  $1\text{--}2^\circ\text{C}$  выше температуры воздуха, а в остальные месяцы близка к ней [2].

Фоновая соленость воды  $S$  в Бенгальском зал. против дельты Годавари мало зависит от стока реки и составляет 32.5–33‰ [2]. Наибольшее уменьшение  $S$  в период половодья отмечается непосредственно вблизи МКД Годавари.

## ОБЩЕГЕОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДЕЛЬТЫ р. ГОДАВАРИ

### *Рельеф и гидрография*

Дельта р. Годавари находится на побережье Бенгальского зал. в восточной части индийского штата Андхра-Прадеш. Дельта представляет собой низменную равнину почти правильной треугольной формы, окруженную с боков небольшими возвышенностями (рис. 1). Диапазон отметок поверхности дельты составляет от 0 до 13 м, уклон ее поверхности –  $\sim 1\%$  [11]. ВД находится вблизи г. Раджамандри, где Нижняя Годавари разделяется на два основных рукава – бóльший левый Гаутами и правый Васишта (рис. 1).

От главного рукава дельты Гаутами влево отходит большое количество небольших водотоков. Часть из них представляет собой остатки некогда больших дельтовых рукавов. Большинство этих ныне небольших водотоков впадают в зал. Какинада. Из этих водотоков наиболее крупные (сверху вниз) – Коранги длиной 11 км и Гадеру протяженностью 25 км [29]. Сам же рук. Гаутами в своей нижней части отделяет влево рук. Нилареву. Оба упомянутых рукава впадают непосредственно в Бенгальский зал. В устьях этих рукавов находятся обширные устьевые бары. Между водотоком Гадеру и рук. Нилареву рас-

положены обширные илистые поймы (mudflats) с густыми мангровыми зарослями. Эти пространства отделены от Бенгальского зал. песчаными пляжами.

Зал. Какинада ограничен с восточной стороны узкой песчаной косой Какинада длиной 21 км [21, 28].

Правый рук. Васишта в нижней части отделяет влево небольшой рук. Вайнатъям. Оба рукава впадают непосредственно в Бенгальский зал. В устье рук. Васишта находится крупный устьевой бар. Вдоль побережья дельты между устьями рукавов Гуатами и Вайнатъям тянутся широкие песчаные пляжи.

На поверхности дельтовой равнины сохранились следы давно отмерших рукавов, а также старые береговые бары в виде песчаных гряд, показывающих положение древних береговых линий.

Площадь дельты Годавари по разным данным составляет от 5100 [21, 28, 29] до 6320 км<sup>2</sup> [14]. По измерениям В.И. Кравцовой (МГУ) с помощью космических снимков площадь дельты Годавари составляет 5490 км<sup>2</sup>, а длина главного рукава — 165 км. Длина МКД по [21] равна 160 км.

#### *Климат и естественные ландшафты*

Дельта Годавари находится в условиях субэкваториального климата с жаркими весной и летом и умеренно теплой зимой. Температура воздуха  $T$  повышается с конца февраля до самого жаркого месяца — мая, когда  $T$  на побережье дельты достигает 35°C, а в ее центральной части >40°C. Самый прохладный месяц — январь с  $T$  вблизи берега 22°C, а в средней части дельты — 19–20°C [11]. Наибольшая  $T = 49^\circ\text{C}$  зарегистрирована в дельте в мае 2002 г. [29].

Климат дельты (так же, как и п-ова Индостан и Бенгальского зал.) подвержен сильному воздействию летнего юго-западного и зимнего северо-восточного муссонов.

Согласно [1] годовая сумма осадков в дельте составляет 1000–1200 мм (в среднем 1100 мм). По более новым данным [27] средняя величина осадков в дельте ~1060 мм, а в период юго-западного муссона ~900 мм.

Основные естественные ландшафты дельты — это обширные болотистые пространства и мангровые заросли вблизи МКД (их площадь составляет 33.1 тыс. га [29]). На возвышенных местах по краям дельты распространены редколесья и саванны.

Дельта Годавари и ее водные объекты обладают большим биоразнообразием и биопродуктивностью. Чрезвычайно богаты как растительность болот, маршей и лесов, так и животный мир дельтовой равнины и водных объектов. В водотоках и водоемах обитают рыбы многих пород, креветки, крабы, моллюски и другие водные животные. Марши и мангры служат местами гнездования, нереста, раз-

множения и откорма для многих видов рыб, моллюсков, ракообразных и пресмыкающихся. Здесь обитает, например, находящаяся под угрозой вымирания оливковая водяная черепаха. Встречаются и крупные животные, например, водяной буйвол. Мангровые леса Коранги — вторые по размеру в Индии после аналогичных лесов в дельте Ганга. Часть этих мангровых лесов благодаря своим знаменитым пресмыкающимся получила статус заповедника дикой природы Коранги [19].

#### *Социально-экономические условия*

Административное понятие дельты р. Годавари отличается от ее геоморфологического толкования. Под дельтой Годавари в административном смысле понимают не только дельтовую равнину с вершиной у г. Раджамандри, но и прилегающие к западу, северу и югу территории. Вся эта площадь подразделена на два административных округа — Восточная и Западная Годавари [26]. К Восточной Годавари отнесена основная часть дельты — территория между крайними левым и правым ее рукавами и земли к северу от рук. Гауатами. Западная Годавари — это земли, находящиеся правее самого нижнего участка р. Годавари и рук. Васишта. Упомянутые округа, в свою очередь, поделены на сельские районы, называемые здесь мандалами (mandals).

По данным [26] в дельте в начале XXI в. проживало ~9 млн. чел., ежегодный прирост населения составлял ~1.8%. Большая часть населения (77%) — сельское, проживающее в многочисленных небольших деревнях. В пределах дельты находятся города Раджамандри, морской порт Какинада, Амалапурам (Восточная Годавари), Нараспур, Бхимаварам (Западная Годавари).

Около двух третей активного населения дельты занято в сельском хозяйстве. Основная возделываемая культура — рис. На плодородных землях дельты обычно получают по два урожая риса в год. Процесс выращивания риса в дельте подразделяют на два сезона — “кариф” (Kharif) с 1 июня по ноябрь (в основном совпадающий с юго-западным муссоном) и “раби” (Rabi) с декабря по апрель [21]. Урожайность риса в дельте — одна из наибольших в Индии [18]. Часть населения занята сбором кокосовых орехов, бананов, выращиванием табака, сахарного тростника, садовых культур.

Для нужд сельского хозяйства в дельте широко используется орошение земель. Орошение обеспечивают упомянутые барражи и так называемая Центральная система каналов Годавари (Godavari Central Canal System), состоящая из основного канала, трех его разветвлений, одного распределительного канала и многочисленных ирригационных каналов. Эта система работает ежегодно в течение 11 мес. с месячным перерывом в апреле–мае [11].

Вблизи рукавов дельты и берега Бенгальского зал. расположены небольшие деревни, где живут рыбаки, занятые выловом рыбы, креветок, крабов и других водных животных. Помимо риса и других продуктов сельского хозяйства, дельта поставляет на рынок креветок, рыбу, крабов. Ранее на их долю приходилось 53, 32 и 15% продуктов вылова соответственно. К настоящему времени на второе место по вылову после креветок переместилась добыча крабов [29].

В последнее время в дельте началась активная разведка нефти [29].

Плотность населения в разных частях дельты различна. На удаленных от Бенгальского зал. и более высоких и сухих участках дельты плотность населения составляет 150–200 чел/км<sup>2</sup>, а в более низких прибрежных районах с плодородными почвами — до 1000–1400 чел/км<sup>2</sup> [26]. Как отмечено в [26], вблизи Бенгальского зал. плотность населения достигла критической величины, поэтому здесь уже невозможно защитить всех жителей от возможных ураганов.

Среди наиболее негативных изменений экологических условий дельты отмечают естественную и особенно — антропогенную деградацию мангровых зарослей, волновое разрушение пляжей, загрязнение вод. Особенно быстрое сокращение площадей, занятых манграми, произошло в последние десятилетия [29]. Причины этого — в расширении сельскохозяйственных земель (вклад в сокращение площади мангров — 81%), развитие аквакультуры (12%), урбанизация (2%). Совсем недавно стали предпринимать попытки восстановления мангровых зарослей [29]. Так, в 1999–2008 гг. мангры успешно восстановлены на площади 375 га.

## ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ДЕЛЬТЕ ГОДАВАРИ

### *Гидрологический режим рукавов дельты*

Гидрологический режим дельты р. Годавари изучен пока недостаточно. В литературе есть лишь самые общие сведения по этому вопросу.

Дельта р. Годавари — микроприливная, поскольку средняя величина приливов в южных частях ее рукавов не превышает 1–1.5 м. Выше барража Довлайсварам в ВД ни приливы, ни нагоны не распространяются.

В годовом цикле взаимодействия вод реки и залива выделяют два периода [30]: муссонное половодье с июля по сентябрь, когда проходит 80% годового стока реки, и межень (октябрь—июнь, ~20% стока). Последний период в свою очередь подразделяется на три фазы [30]: “восстановительную”, или постмуссонную (октябрь—декабрь, ~15% стока); “стабильную” (январь—март, ~2% стока), когда в устьях рукавов складываются условия, типичные для эстуариев; “сухую”, или предмуссонную (апрель—

июнь, ~3% стока), когда влияние залива на дельту (в том числе ураганов) наибольшее.

Приближенный расчет водного баланса дельты Годавари может быть сделан на основе подтвержденной по материалам наблюдений гипотезы, согласно которой испарение воды с увлажненных поверхностей дельты близко к величине испаряемости [6]. Если принять, как было указано выше, среднегодовые величины осадков и испаряемости, равными 1100 и 1750 мм соответственно, а площадь дельты 5490 км<sup>2</sup>, то можно рассчитать, что ежегодно в дельте должно теряться  $(1750-1100) \times 5490 \times 10^{-6} = 3.6$  км<sup>3</sup> речной воды. Это составит 3.7% стока воды, в среднем ежегодно поступающего в дельту (96.5 км<sup>3</sup>). Рассчитанная доля потерь водного стока соответствует аналогичным цифрам для крупных дельт, также находящихся в условиях недостаточного увлажнения [6], когда индекс сухости находится в диапазоне от 1.0 до 3.0. Для дельты Годавари эта величина равна 1.59. Таким образом, в Бенгальский зал. р. Годавари выносит в среднем не 96.5, а 92.9 км<sup>3</sup>/год, а возможно, из-за безвозвратного водозабора на орошение ниже ВД — еще меньше.

Водный сток в ВД распределяется по двум основным рукавам Гаутами и Васишта в пропорции 67 : 33 (в среднем 64.6 и 31.9 км<sup>3</sup>/год соответственно) [28].

При расходах воды  $Q$  в ВД >50 тыс. м<sup>3</sup>/с часть дельты залива водой. При  $Q > 80$  тыс. м<sup>3</sup>/с происходят катастрофические наводнения [17].

Хотя в последние десятилетия под влиянием антропогенных факторов сток взвешенных наносов Годавари заметно уменьшился [21], мутность воды в рукавах дельты остается высокой — в среднем ~0.6 кг/м<sup>3</sup>. В период муссонного половодья мутность воды может увеличиваться до 3 кг/м<sup>3</sup>. В воде рукавов дельты велико содержание органических и биогенных веществ (БВ) [16, 30]. Особенно велика их концентрация в водотоках, протекающих среди болот, илистых пойм и мангровых зарослей, например, в водотоках Коранги и Гадеру на севере дельты. Здесь концентрация БВ составляет 3–6 мкг/л. У дна содержание БВ, как правило, больше, чем на поверхности. В рук. Васишта содержание БВ меньше, чем в водотоках системы рук. Гаутами.

Температура воды в рукавах дельты высокая в течение всего года [30]. Летом она достигает на поверхности 29–32, у дна — 29–31°C. В декабре—феврале температура воды снижается до 25–29°C.

### *Процессы смешения речных и морских вод*

Приморские участки рукавов дельты р. Годавари, особенно в ее северной части, представляют собой типичные “положительные” эстуарии, имеющие расширяющиеся в сторону моря русла и характеризующиеся активными процессами смешения реч-

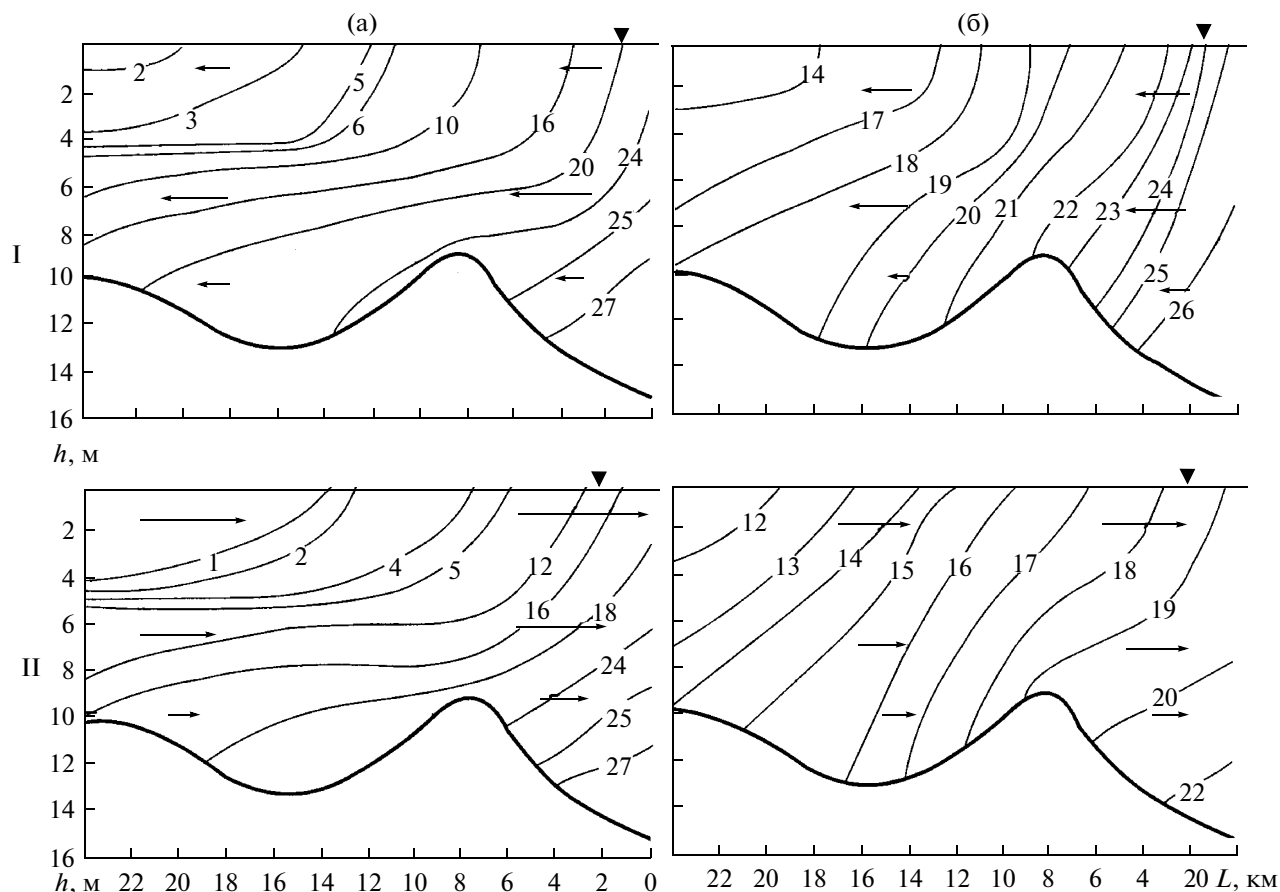


Рис. 3. Распределение солёности воды, ‰, в эстуарии Гаутами в периоды муссонного половодья в июне 1986 г. (а) и межени в январе 1987 г. (б), в прилив (I) и отлив (II) по [30]. Стрелки – приливные и отливные течения.

ных и морских вод. При этом солёность воды  $S$  в этих рукавах возрастает в сторону Бенгальского зал. во все фазы режима стока реки и приливов [16, 30].

Некоторое представление о характере процессов смешения вод реки и залива дают схемы распределения  $S$  на нижнем участке рук. Гаутами для двух фаз режима реки – половодья (рис. 3а) и межени

(рис. 3б) и для двух фаз прилива – приливной (3I) и отливной (3II). Результаты приближенной количественной оценки характеристик процесса смешения (градиентов  $S$ ), сделанных автором статьи на основе рис. 3, приведены в табл. 2. Расчеты проведены с точностью до 1‰ отдельно для условий половодья и межени, приливной и отливной фаз и для

Таблица 2. Солёность воды  $S$ , ‰, на разных горизонтах и средняя по глубине  $S_{\text{ср}}$ , ‰, вертикальные и горизонтальные ее градиенты  $\Delta S_{\text{в}}$ , ‰, и  $\Delta S_{\text{г}}$ , ‰, и величины параметра стратификации  $n$  на нижнем участке рук. Гаутами

Фаза режима стока реки	Фаза приливов	Горизонт	Устьевой створ (УС)				10 км выше УС				$\Delta S_{\text{г}}$
			$S$	$S_{\text{ср}}$	$\Delta S_{\text{в}}$	$n$	$S$	$S_{\text{ср}}$	$\Delta S_{\text{в}}$	$n$	
Половодье	Прилив	Поверхность	6	15	18	1.20	2	11	18	1.64	4
		Дно	24				20				4
	Отлив	Поверхность	3	11.5	17	1.48	0	9	18	2.00	3
		Дно	20				18				2
Межень	Прилив	Поверхность	18	19.5	3	0.15	12	15	6	0.40	6
		Дно	21				18				3
	Отлив	Поверхность	16	17.5	3	0.17	12	13.5	3	0.22	4
		Дно	19				15				4



двух поперечных сечений: устьевого створа (УС), находящегося в ~3 км выше гребня устьевого бара (10 км по шкале на рис. 3), и створа в 10 км выше по течению от УС. Данные рис. 3 и табл. 2 позволяют сделать следующие выводы:

пресные воды рук. Гаутами поступают в прибрежную зону Бенгальского зал., где величины  $S$  составляют ~24‰ в поверхностном и ~27‰ в придонном слоях;

течения в рукаве имеют реверсивный характер, т.е. направлены по всему поперечному сечению русла либо в сторону залива (в отлив), либо в сторону суши (в прилив); разнонаправленные течения на поверхности и у дна, по-видимому, могут наблюдаться лишь в периоды, близкие к моментам смены течений (slack water) с приливного на отливное и наоборот; скорости как отливных, так и приливных течений больше в половодье и меньше в межень; скорости отливных течений, как правило, больше приливных; скорости во все фазы режима речного стока и приливов немного увеличиваются в сторону залива;

горизонтальные градиенты  $S$  как в поверхностном слое, так и у дна больше в межень и меньше в половодье; это означает, что протяженность зоны смещения речных и морских вод в межень короче, чем в половодье;

вертикальные градиенты  $S$  в половодье и отливную фазу заметно больше, чем соответственно в межень и приливную фазу; в устьевом створе вертикальные градиенты  $S$  немного меньше, чем в 10 км выше по течению;

в половодье перемешивание вод по глубине и характер стратификации соответствуют типу слабое перемешивание и клин осолоненных вод, а в межень – типу частичное перемешивание и умеренная стратификация. Этим двум типам процесса смешения речных и морских вод отвечают величины параметра стратификации  $2.0 \geq n > 1.0$  и  $1.0 \geq n > 0.1$  соответственно [5]. Здесь  $n = \Delta S_v / S_{cp}$ , где  $\Delta S_v$  – вертикальный градиент  $S$ , равный  $S_{дно} - S_{пов}$ , где  $S_{дно}$  и  $S_{пов}$  – соленость воды у дна и на поверхности,  $S_{cp} = 0.5(S_{пов} + S_{дно})$ .

#### *Воздействие на дельту ураганов и штормовых нагонов*

Как и весь Бенгальский зал. и его берега, побережье индийского штата Андхра-Прадеш, включая дельту р. Годавари, подвержено сильному воздействию тропических циклонов и ураганов [25, 26, 32].

Тропические циклоны обычно зарождаются в южной или центральной части Бенгальского зал. либо перед летним юго-западным муссоном (в апреле–мае), либо сразу после него (в сентябре–ноябре). Как правило, траектории движения циклонов направлены на север, север-северо-восток и северо-восток, к вершине залива [32]. По мере

перемещения вдоль залива многие тропические циклоны приобретают силу урагана и обрушиваются на побережье общей дельты Ганга и Брахмапутры, вызывая наводнения и бедствия, как, например, в Бангладеш 12–13 ноября 1970 г. и 29 апреля 1991 г. [7]. Однако некоторые циклоны приобретают необычные траектории: либо поворачивают к востоку и наносят большой ущерб хозяйству и населению дельты Иравади (например, во время урагана в мае 2008 г. [3]), либо поворачивают на запад и обрушиваются на побережье штата Андхра-Прадеш. Такие тропические циклоны и ураганы, сопровождающиеся сильным ветром и волнением, ливневыми осадками, нагонами и наводнениями, могут наносить хозяйству, населению и экосистемам дельты р. Годавари большой ущерб.

Метеорологическая служба Индии подразделяет циклоны и ураганы на три группы [25, 26, 32]: циклонические штормы (скорость ветра  $W$  от 17 до 28 м/с), жестокие циклонические штормы ( $W$  от 28 до 33 м/с) и тропические ураганы ( $W > 33$  м/с, или  $>119$  км/ч).

По данным [25, 32] за 100-летний период (1877–1976 гг.) на побережье штата Андхра-Прадеш обрушились 39 жестоких штормов и ураганов, причем в основном в осенне-зимние месяцы (октябрь–декабрь). За этот же период в вершине Бенгальского зал., в дельте Ганга и Брахмапутры, отмечено заметно больше таких явлений – 139.

В [26] приведены сведения о наиболее жестоких и разрушительных тропических циклонах и ураганах в районе дельты р. Годавари более чем за 300-летний период. При этом установлено, что наиболее сильное воздействие на дельту оказывают штормы и ураганы, подходящие к ней прямо с востока.

Катастрофические штормы отмечались еще в XVII–XIX вв. Разрушительные ураганы случались, например, в 1679 (тогда на побережье погибло 20 тыс. чел.), 1706 и 1788 гг.

Сведения о наиболее сильных и разрушительных штормах и ураганах в последние десятилетия XX в. приведены в табл. 3. Автор статьи [26] особо отметил события в ноябре 1977, ноябре 1984, июле 1989, мае 1990 и октябре 1996 гг. Эти ураганы сопровождались сильными и продолжительными ливнями ( $>200$  мм осадков в течение нескольких дней), большими наводнениями и жертвами среди местного населения.

Скорость ветра во время урагана в ноябре 1977 г. составляла 62.5–69.5 м/с (225–250 км/ч). Этот ураган нанес огромный ущерб населению (погибло  $>10$  тыс. чел.) и хозяйству дельты Годавари. Ураган в ноябре 1984 г. был самым сильным за 1978–1995 гг. Ураган в июле 1989 г. охватил почти весь штат Андхра-Прадеш, в результате сильного наводнения оставив 9 млн. жителей без крова. Ураган в мае 1990 г. по охвату территории и интенсивности был похож на

**Таблица 3.** Сведения о наиболее крупных тропических циклонах и ураганах у берегов штата Андхра-Прадеш начиная с 1977 г. по [26] (прочерк – отсутствие данных)

Дата	Число			Площадь пострадавших сельскохозяйственных земель, тыс. га
	погибших	лишившихся крова, млн.	разрушенных домов, тыс.	
Ноябрь 1977	>10000	–	–	–
Май 1979	706	–	748	–
Ноябрь 1984	430	–	–	–
Август 1986	309	–	423	853
Июль 1989	232	8.94	–	593
Май 1990	817	7.78	1440	563
Октябрь–ноябрь 1991	192	–	97.5	499
Ноябрь 1995	229	0.23	146.5	665
Октябрь 1996	338	0.14	450	1029
Ноябрь 1996	1059	7.1	646	236

ураган в ноябре 1977 г. Майский ураган 1990 г. разрушил более 1.4 млн. домов, нанес ущерб сельскохозяйственным землям на площади более 0.5 млн. га.

Самым катастрофическим за последние десятилетия XX в. стал ураган 07В 6–7 ноября 1996 г. Циклонический вихрь зародился над центральной частью Бенгальского зал. 4 ноября. Его траектория была направлена почти строго на запад. К утру 5 ноября циклон превратился в тропический шторм с центром в 300 км от побережья. Под утро 6 ноября он трансформировался в жестокий шторм, а подойдя к МКД Годавари, превратился в настоящий ураган. На дельту он обрушился в ночь с 6 на 7 ноября. Над побережьем и дельтой ураган представлял собой огромный атмосферный вихрь диаметром ~400 км. Скорость ветра в его центре составляла 48.5–61.0 м/с (175–220 км/ч). Количество выпавших на поверхность дельты осадков составило от 10 до 200 мм. Ураган привел к возникновению нагона высотой 2–2.5 м. Нагонная волна не только распространилась вверх по рукавам дельты, но и привела к сильному затоплению приморской полосы шириной 5–6 км [26].

Ураган 07В нанес хозяйству и населению дельты р. Годавари огромный ущерб. По масштабу экологического ущерба этот ураган лишь немногим уступал ураганам в ноябре 1977 и мае 1990 гг. [26]. Во время урагана погибло более 1000 чел., пострадали 7.12 млн. чел. (>80% населения дельты), 464 деревни в Восточной и 901 – в Западной Годавари. Были разрушены или серьезно повреждены 314 тыс. домов и 332 тыс. домов повреждены частично. Две трети пострадавших домов находились в Восточной Годавари. В приморских деревнях, где живут рыбаки, потонуло большое количество рыболовных

судов и лодок. Погибло более 6.8 тыс. голов скота. Ураган нанес огромный ущерб посевам риса. В результате затопления, длившегося 3–4 дня, погибло 174 тыс. га рисовых чеков в Восточной Годавари и 162 тыс. га – в Западной. Потери урожая риса составили ~450 тыс. т стоимостью 3.36 млрд индийских рупий. Пострадали также кокосовые деревья на площади >30 тыс. га. Общий экономический ущерб оценен в 61.3 млрд индийских рупий (для сравнения, сумма ущерба во время ураганов в августе 1986 г. была 16.87 млрд, в мае 1990 г. – 21.37 млрд индийских рупий [26]).

Важна в научном и практическом отношении оценка повторяемости жестоких тропических штормов и ураганов в рассматриваемом регионе. Уменьшается или увеличивается частота таких событий? По этому вопросу в литературе имеются противоречия. Так, по [25] число тропических циклонов и ураганов за каждое десятилетие в 100-летнем периоде (1877–1976 гг.) неуклонно увеличивалось и наиболее штормовыми за этот период были 1957–1976 гг. По мнению автора статьи [26] обнаруженная ранее тенденция к увеличению повторяемости жестоких штормов и ураганов во всем Бенгальском зал. в 1977–1996 гг., наоборот, уменьшилась по сравнению с 1877–1976 гг.

Автор настоящей статьи полагает, что это заключение [26] неверно по следующим причинам. Во-первых, выводы в [26] основаны на анализе данных лишь о циклонах и ураганах вблизи побережья штата Андхра-Прадеш, а не по всему Бенгальскому зал. Во-вторых, приведенные автором [26] данные (табл. 3) противоречат сделанному им же заключению. После 1976 г. в районе дельты Годавари отмечен ряд очень крупных и разрушительных ураганов,

как, например, в ноябре 1977, мае 1979, мае 1990, октябре и ноябре 1996 гг. В-третьих, после 1977 г. в других районах Бенгальского зал. произошли выдающиеся ураганы, принесшие огромные бедствия. На побережье Бангладеш обрушивались сильные ураганы в 1985, 1987, 1988 (дважды) и 1991 гг. [7, 32]. Последний из них по количеству жертв (139 тыс. чел.) был одним из самых катастрофических в истории Бангладеш. Ураган Наргис в начале мая 2008 г. оказался самым разрушительным в истории Мьянмы (Бирмы), его жертвами стали более 300 тыс. чел. [3]. В-четвертых, вывод [26] противоречит выявленной в последние десятилетия глобальной тенденции к увеличению повторяемости и силы тропических и внетропических циклонов, ураганов и тайфунов, что объясняется изменениями климата и циркуляции атмосферы [12, 32]. Согласно [12] воздействие циклонов и ураганов на прибрежные районы мира в XXI в. может еще более усилиться. Это будет усугублено ускоряющимся повышением уровня Мирового океана и связанных с ним морей.

Почти все морские берега Индии подвержены воздействию тропических циклонов и ураганов, поэтому проблемам предупреждения об этих явлениях и мерам по защите и ликвидации последствий в Индии уделяется большое внимание. Достаточно сказать, что сама Метеорологическая служба страны была создана в 1865 г., после вызванного ураганом катастрофического наводнения в районе Калькутты (дельта Ганга) в 1864 г. На созданную службу были возложены задачи предсказания ураганов и предупреждения об их приближении. Позже в ряде приморских штатов были созданы специальные центры по оповещению об ураганах (Cyclonic Warning Centers). В городах Какинада, Вишакхапатам и Неллоре в районе дельты Годавари такие центры были организованы в 1978 г. (после катастрофического урагана в ноябре 1977 г.). Создание таких центров несколько смягчило негативные для населения последствия ураганов, случившихся в последнее время. Так, ураганы в ноябре 1977 г. и мае 1990 г. имели схожие гидрометеорологические характеристики, и относились к пятой, наивысшей категории по международной классификации. Однако своевременное оповещение о приближающемся урагане и эвакуация населения во время урагана в мае 1990 г. позволили избежать тех огромных жертв, которые случились в ноябре 1977 г., когда служба оповещения еще не функционировала (в ноябре 1977 г. погибло более 10000 чел., а в мае 1990 г. ~1000) [26]. В ноябре 1996 г. служба оповещения сработала плохо: ураган 07В перемещался очень быстро и обрушился на плотно населенную дельту Годавари на 5–6 ч раньше, чем предполагалось.

Помимо системы оповещения и организации эвакуации населения в дельте Годавари применяют защитные меры инженерного характера: строитель-

ство устойчивых к ураганам зданий, сооружение защитных дамб и специальных укрытий для людей.

## МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В УСТЬЕ р. ГОДАВАРИ

### *Общие закономерности процессов дельтообразования в устье р. Годавари*

В период последнего оледенения уровень Бенгальского зал., так же как и всего Мирового океана, находился на 100–120 м ниже современного. В это время в заливе значительно восточнее нынешней береговой линии на шельфе или даже на материковом склоне формировался обширный совместный конус выноса рек Годавари и Кришна. Его протяженность вдоль берега составляла ~200 км [9]. Конус состоял из комплекса дельт, расположенных на шельфе и его крае, из эрозионных русел на континентальном склоне и глубоководной области аккумуляции. Конус выноса слагали пески и илы, вынесенные обеими реками.

Во время голоценовой трансгрессии конус выноса был затоплен, перекрыт более молодыми речными и морскими отложениями; береговая линия сместилась на запад, причем намного дальше современного ее положения.

После относительной стабилизации уровня залива, т.е. 6–7 тыс. лет назад, на побережье и в прибрежной зоне начали формироваться (уже независимо друг от друга) дельты рек Годавари и Кришна.

Сток наносов Годавари был достаточно велик и поэтому заполнение прибрежной части залива речными наносами происходило быстро.

За голоценовую историю дельтовой равнины р. Годавари здесь сформировалось, по крайней мере, девять дельтовых лопастей [22], т.е. отдельных частных наложенно-причлененных дельт (рис. 4). Процесс образования каждой лопасти включал несколько этапов:

прорыв русла в новом направлении (либо в отставшую в своем развитии низменную часть дельты, либо по кратчайшему расстоянию к заливу);

быстрое выдвигание новой лопасти в сторону залива с формированием либо наложенной (образующейся на поверхности старой дельты), либо причлененной (развивающейся в прибрежной зоне залива на периферии старой дельты), либо комплексной наложенно-причлененной частной дельты;

формирование русловой сети новой частной дельты;

постепенное удлинение и повышение нового русла, уменьшение продольного уклона, что создавало предпосылки для нового прорыва в гидравлически более выгодном направлении;

потеря русловой системой частной дельты стока вследствие его отвлечения в новый прорыв, отмирание русловой сети старой лопасти, ее волновой

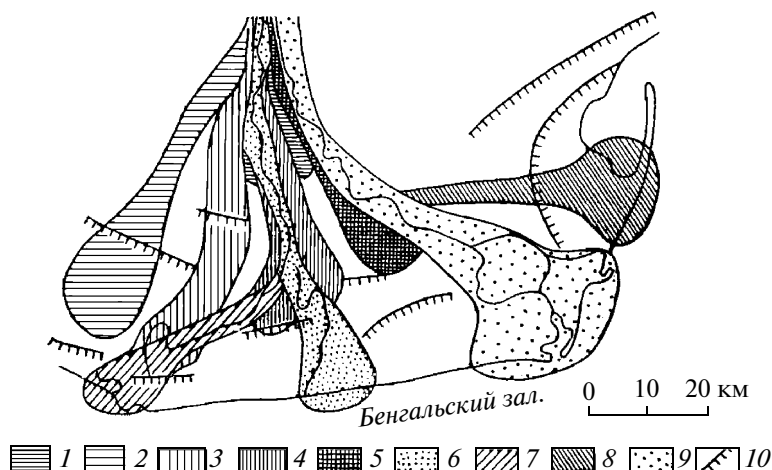


Рис. 4. Схема последовательного (1–9) формирования дельтовых лопастей в устье р. Годавари по [22], 10 – древние береговые бары.

размыв, формирование из продуктов этого размыва береговых баров, пляжей, кос.

Описанная цикличность формирования дельты Годавари подтверждается наличием на современной дельтовой равнине неровностей аккумулятивного рельефа, остатков отмерших и отмирающих водотоков, древних береговых форм в виде песчаных гряд, расположенных на разном расстоянии от современного МКД (рис. 4).

Скачкообразное развитие дельты р. Годавари с образованием частных дельт (лопастей) характерно для процесса дельтообразования в устьях рек с большим содержанием речных наносов (не менее  $1 \text{ кг/м}^3$  в половодье). Так в прошлом развивались, например, дельты Терека, Сулака, Или, Амударьи, Миссисипи, Хуанхэ [5].

Согласно схеме на рис. 4 последними по времени формирования были четыре дельтовые лопасти, в пределах которых еще сохранились русла рукавов, ставших основой каждой частной дельты. Самой древней из этих лопастей была, по-видимому, частная дельта рук. Вайнатям, ориентированная от ВД прямо на юг (рис. 4, 6). Позже на расстоянии  $\sim 30 \text{ км}$  от устья рук. Вайнатям произошел прорыв русла на юго-запад, в результате чего сформировалась лопасть нижней части рук. Васишта (рис. 4, 7). На древность нынешних рукавов Вайнатям и Васишта указывает их большая извилистость.

Согласно схеме на рис. 4 предпоследней по времени образования была дельтовая лопасть, прилегающая к современному зал. Какинада (рис. 4, 8), на верхнюю часть которой позже наложились лопасть нынешнего рук. Гаутиами (рис. 4, 9). Такая последовательность событий представляется сомнительной. Как будет показано ниже, вся часть дельты р. Годавари, прилегающая к зал. Какинада, очень

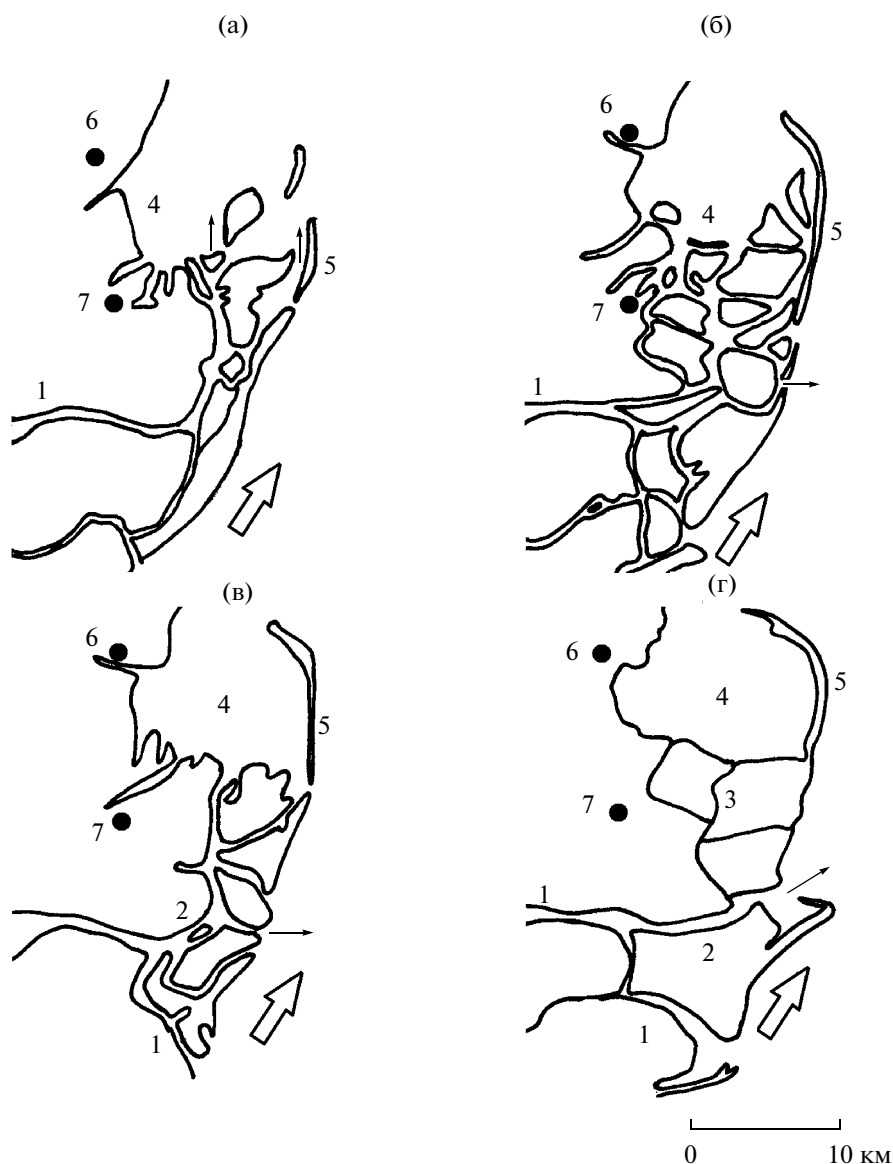
молода (она сформировалась в XIX–XX вв. преимущественно из наносов рук. Гаутиами). Поэтому всю северо-восточную часть дельты р. Годавари следует рассматривать как частную наложенно-причлененную дельту рук. Гаутиами, состоящую из нескольких русловых разветвлений. Дельтовая лопасть рук. Гаутиами в настоящее время – самая крупная и активная во всей дельте Годавари.

Не исключено, что в будущем может произойти новый прорыв с образованием новой дельтовой лопасти, например, в депрессии к югу и юго-западу от рук. Гаутиами.

#### *Процессы дельтообразования в последние полтора века*

Большой сток наносов р. Годавари, в особенности возросший в связи с усилением эрозии в бассейне реки после начала массовой вырубке лесов под сельское хозяйство в 1870-х гг., способствовал активизации процессов дельтообразования. В конце XIX в. очень быстро развивалась левая часть русловой системы рук. Гаутиами. Рукава Коранги и Гадеру быстро наполнили своими отложениями зал. Коранги (ныне залив-лагуна Какинада) (рис. 4, 5а, 5б)

Деревня Коранги в 1889 г. находилась в 4 км от берега одноименного залива, а в 1929 г. – уже в 8 км от него [28]. Береговая линия выдвинулась в залив, таким образом, на 4 км за 40 лет ( $100 \text{ м/год}$ ). В это же время из продуктов размыва части дельты, находящейся к югу от устьев рукавов Коранги и Гадеру, начала формироваться коса Какинада. Блокировка зал. Коранги с морской стороны косой способствовала его быстрому заилению. К этому же вело и поступление в залив наносов рук. Гаутиами. Сначала этот рукав под влиянием растущей косы Какинада



**Рис. 5.** Схема изменения устья рук. Гаутами с 1889 по 2001 г. по [28]. а–г – 1889, 1929, 1958, 2001 гг. соответственно. Рукава: 1 – Гаутами, 2 – Нилареву, 3 – Галеру; 4 – зал. Коранги (позже – зал. Какинада); города и населенные пункты: 6 – Какинада, 7 – Коранги. Черные стрелки – русловые, белые – вдольбереговые потоки.

отклонился на север и, впадая в зал. Коранги, выдвинулся на 4 км за 30 лет (133 м/год) [28]. К середине 1950-х гг. рук. Гаутами прорвал косу Какинада и, разделившись на два русла (Гаутами и Нилареву), стал впадать непосредственно в Бенгальский зал. (рис. 5в, 5г).

Коса Какинада продолжала удлиняться в северном, а затем и западном направлении, почти полностью блокировав зал. Какинада (рис. 5б, 5в, 5г). Источником наносов для удлинения косы служил размыв баров в устьях рукавов Нилареву и Гаутами и вдольбереговой перенос наносов с юго-запада. Необходимо обратить внимание на то, что формирова-

ние аналогичных кос – характерный процесс в устьях рек, подверженных воздействию морского волнения, способствующего одновременно размыву МКД и преобладающему одностороннему вдольбереговому потоку наносов. Таковы, например, Сулакская и Куринская косы в устьях Сулака и Куры [5]. Иногда такие косы образуются по обе стороны от дельтового выступа и ориентированы в разные стороны, как, например, в устьях Эбро и Роны. В устьях рукавов Гаутами и Нилареву находятся большие устьевые бары речно-морского типа [5], состоящие из барового осередка, а также береговых баров и барьерных островов, сформировавшихся под влиянием волнения. Ориентированы эти аккумулятив-

ные формы на север и северо-восток в соответствии с преобладающим волнением, течениями и вдольбереговым потоком наносов. К югу и юго-западу от устьев рукавов вследствие «бунного» эффекта отлагается часть наносов, переносимых вдольбереговым потоком [21, 28].

Судя по схемам устьевой части рук. Гаутами (рис. 5в, 5г), в 1958–2001 гг. более активным стало не правое русло (Гаутами), а левое (Нилареву). Это русло более широкое и прямое, бар в его устье выдвинулся за указанный период на ~3.5 км. В целом, МКД между устьями обоих рукавов выдвинулся за этот период в Бенгальский зал. на 2.5 км. Вдоль МКД сформировался широкий песчаный пляж, ограничивающий пояс илистой поймы и мангровых болот.

Второй участок МКД, где выявлено некоторое выдвигание берега в Бенгальский зал., — устье рук. Васишта. Здесь нарастание дельты выражено значительно слабее, чем в устьях рукавов Нилареву и Гаутами. Более того, в последние десятилетия выдвигание устья рук. Васишта начало сменяться отступанием. В устье рук. Васишта находится устьевой бар, элементы которого — береговые бары и барьерные острова, сформированные волнением. Ориентированы эти аккумулятивные формы на юг и юго-запад, что свидетельствует о существовании вдольберегового потока наносов с северо-востока на юго-запад. Это служит доказательством более сложной картины распределения вдольбереговых составляющих волнения и потока наносов, чем полагали ранее [8, 31]. По-видимому, изменение направления преобладающего вдольберегового потока происходит на участке сильного размыва МКД между устьями рукавов Гаутами и Вайнатям (рис. 1).

В последние десятилетия в устьях рукавов Вайнатям и Васишта отмечена активизация размыва. Барьерные острова к юго-западу от устьев этих рукавов заметно сместились к юго-западу и приблизились к МКД.

Как указано в [21, 28], волновой размыв МКД на участке между устьями рукавов Гаутами и Вайнатям активизировался после 1965 г. За 1965–2001 гг. (35 лет) берег отступил в среднем на 500 м (>14 м/год) [28]. Продукты размыва берега волнением и течениями переносятся как на северо-восток, так и на юго-запад.

В целом в последние полвека на МКД Годавари преобладал размыв. По [21] на протяжении МКД с общей длиной 160 км за 1976–2001 гг. суммарное увеличение площади дельты вследствие ее выдвигания в Бенгальский зал. составило 2967 га, а суммарная площадь размыва 4803 га (табл. 4). В итоге, потеря земель в результате преобладания размыва над аккумуляцией составила за 25 лет 1836 га

**Таблица 4.** Величины выдвигания и отступления МКД Годавари за 1976–2001 гг. по [21]

Период (число лет)	Площадь, га		Итоговые изменения площади	
	выдвигания (+)	отступления (–)	га	га/год
1976–1992 (16)	+1950	–3014	–1064	–66.5
1992–1997 (5)	+495	–982	–487	–97.4
1997–1999 (2)	+242	–378	–136	–68.0
1999–2001 (2)	+280	–429	–149	–74.5
1976–2001 (25)	+1836	–2967	–1836	–73.44

(73.44 га/год). При этом согласно [21] эрозия преобладала на участке МКД длиной 102 км, в то время как выдвигание дельты преобладало на участке МКД длиной лишь 48 км. Согласно данным табл. 4 после 1992 г. интенсивность размыва МКД несколько усилилась.

На основе анализа топографических карт, а после 1992 г. — космических снимков в [21] выявлены основные современные места выдвигания дельты Годавари в Бенгальский зал. (устья рукавов Нилареву и Гаутами) и районы МКД с сильным размывом. Причина преобладания в настоящее время общего размыва МКД Годавари — комплекс факторов, из которых главные (в порядке важности) — существенное сокращение стока наносов реки во второй половине XX в.; увеличение повторяемости и силы штормов, вызванных тропическими циклонами и ураганами; эвстатическое повышение уровня моря. Эти три фактора, скорее всего, будут и в XX в. оказывать сильное и, возможно, усиливающееся воздействие на МКД Годавари. Поэтому размыв берегов дельты будет продолжаться, что, несомненно, нанесет ущерб населению, хозяйству и экосистемам дельты. Потребуется переносить деревни дальше от берега и переселять людей из опасной зоны, шире применять защитные меры, в частности, восстанавливать мангровые заросли.

Таким образом, во второй половине XX в. существенно изменилась и общая тенденция развития дельты р. Годавари: активное нарастание всей дельты, происходившее ранее, теперь, несмотря на продолжающееся выдвигание устьев рукавов Гаутами и Ниловеру, сменилось общим размывом ее МКД и отступанием. Дельта Годавари изменила свой тип: из дельты, формирующейся под преобладающим влиянием речных факторов, она превратилась в

дельту, в развитии которой главную роль стало играть разрушающее воздействие морского волнения.

### ВЫВОДЫ

Дельта Годавари (второй по водоносности реки Индии) представляет собой один из наиболее густонаселенных и важнейших сельскохозяйственных регионов страны.

Занимая промежуточное положение между речным бассейном и Бенгальским зал., дельта является зоной взаимодействия речных и морских факторов. Особенности современной дельты Годавари – ее большая зависимость от речного стока и режима залива. Сток воды р. Годавари в вершине дельты, несмотря на возросший водозабор на орошение, пока не уменьшился и составил за 1988–2003 гг. в среднем 96.5 км<sup>3</sup>/год. В то же время сток взвешенных наносов в результате сооружения многочисленных плотин сократился во второй половине XX в. со 170 в 1969–1980 гг. до 56.8 млн. т/год в 1990–1998 гг. Во второй половине XX в. заметно усилилось воздействие на дельту тропических циклонов и ураганов. На морском крае дельты Годавари также оказывает влияние эвстатическое повышение уровня океана, просадка грунта и морское волнение.

В результате уменьшения стока наносов реки и усиления морского воздействия активизировались процессы размыва МКД. За 1976–2001 гг. прирост площади дельты составил 2967 га, а площадь абразии 4803 га; результирующее сокращение размера дельты оказалось равным 1836 га. Среди немногих участков продолжающегося выдвигания дельты в залив – устья рукавов Нилаверу и Гаутами. Во второй половине XX в. дельта Годавари изменила свой тип и превратилась из дельты с преобладанием в ее развитии речных факторов (прежде всего стока наносов) в дельту с преобладанием волнового размыва. Выявленные тенденции в развитии дельты Годавари сохраняются и в будущем. Возможно также усиление процессов проникновения морских вод в рукава дельты.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Атлас Мирового водного баланса. М.;Л.: Гидрометеоиздат, 1974. 63 с.
2. Атлас океанов. Аталнтический и Индийский океаны. Л.: ГУНИО МО СССР, 1074. 153 с.
3. Кравцова В.И., Михайлов В.Н., Кидяева В.М. Гидрологический режим, морфологические особенности и природно-территориальные комплексы дельты р. Иравади (Мьянма) // Вод. ресурсы. 2009. Т. 36. № 3. С. 259–276.
4. Мировой водный баланс и водные ресурсы Земли. Л.: Гидрометеоиздат, 1974. 638 с.
5. Михайлов В.Н. Гидрология устьев рек. М.: Изд-во МГУ, 1998. 176 с.
6. Михайлов В.Н. Влияние дельт на среднемноголетний водный сток рек // Вод. ресурсы. 2004. Т. 31. № 4. С. 389–394.
7. Михайлов В.Н., Доценко М.А. Особенности гидрологического режима устьевой области рек Ганга и Брахмапутры // Вод. ресурсы. 2006. Т. 33. № 4. С. 389–409.
8. Океанографическая энциклопедия. Л.: Гидрометеоиздат, 1974. 631 с.
9. Bastia R., Vayak P., Singh P. Shelf delta to deepwater basin: a depositional model for Krishna-Godavari basin // <http://www.searchanddiscovery.net/documents/2007/17011bastia/images/bastia.pdf>
10. Biksham G., Subramanian V. Sediment transport of the Godavari River basin and its controlling factors // J. Hydrology. 1988. V. 101. P. 275–290.
11. Bobba A.G. Numerical modelling of salt-water intrusion due to human activities and sea-level changes in the Godavari delta, India // Hydrol. Sci. 2002. № 47. Special Issue. P. S67–S80.
12. Climate Change 2007. Synthesis Report. Summary for Policymakers // [www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch)
13. Coleman J.M., Huh O.K. Major world deltas. A perspective from the space // <http://www.geol.lsu.edu>
14. Coleman J.M., Wright L.D. Modern river deltas: variability of processes and sand bodies // Deltas – models for exploration. Houston: Houston Geol. Soc., 1975. P. 99–149.
15. Dai A., Trenberth K.E. Estimates of freshwater discharge from continents: latitudinal and seasonal variations // J. Hydrometeorology. 2002. V. 3. P. 661–687.
16. Ganapati P.N., Rama S.D.V. Mixing and circulation in Gautami – Godavari estuary // Current Sci. (India). 1965. V. 34. № 22. P. 631–632.
17. Gujja B., Dalai S. Variability of daily discharges of Godavari River due to climate change in coming decades and its implications to infrastructure and people // <http://iopscience.iop.org/1755-1315/6/40/402008/>
18. <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/236692/Godavari-River>
19. [http://en.wikipedia.org/wiki/Godavari\\_River](http://en.wikipedia.org/wiki/Godavari_River)
20. <http://grdc.bafg.de>
21. Malini B.H., Rao K.N. Coastal erosion and habitat loss along the Godavari delta front – a fallout of dam construction (?) // Current Science. 2004. V. 87. № 9. P. 1232–1236.
22. Mallik T.K. Distribution patterns of heavy minerals from the northern part of the Godavari delta off Kakinada // Ind. J. Mar. Sci. 1981. V. 10. P. 51–56.
23. Meade R.H. River-sediment inputs to major deltas // Sea-level rise and coastal subsidence, Causes, consequences and strategies. Dordrecht; Boston; London: Kluwer Academ. Publ., 1996. P. 63–85.
24. Milliman J.D., Rutkowski Ch., Meybeck M. River discharge to the sea. A Global River Index (GLORI) // LOICZ Reports and Studies. 1995. 125 p.

25. *Mooley D.A.* Severe cyclonic storms in the bay of Bengal: 1877–1976 // *Monthly Weather Rev.* 1980. V. 108. P. 1647–1655.
26. *O'Hara G.* Hurricane 07B in the Godavari delta, Andhra Pradesh, India: vulnerability, mitigation and spatial impact // *Geograph. J.* 2001. V. 167. № 1. P. 23–38.
27. *Rao G.N.* Interannual variations of monsoon rainfall in Godavari River basin – connections with the Southern Oscillation // *J. Climate.* 1998. V. 11. P. 768–771.
28. *Rao K.N., Sadakata N., Malini B.H., Takayasu K.* Coastal forms and processes of the Godavari delta, India // [www.megadelta.ecnu.edu.cn/main/upload/kakanaextended.pdf](http://www.megadelta.ecnu.edu.cn/main/upload/kakanaextended.pdf)
29. *Rao R.G.* Climate change mitigation through reforestation in Godavari mangroves in India // *Int. J. Climate Change, Strategies and Management.* 2009. V. 1. № 4. P. 340–355.
30. *Rao R.V., Ramana Y.U., Redely B.S.* Salinity and current distribution in the Godavari estuary, east coast of India // *Ind. J. Mar. Sci.* 1988. V. 17. № 1. P. 14–18.
31. *Sastry J.S., Vethamony P., Swamy G.N.* Morphological changes at Godavari delta region due to waves, currents and the associated physical processes // *Memoir Geol. Soc. India.* 1991. № 22. P. 139–151.
32. *Siefert W., Murty T.S.* Storm surges, river flow and combined effects. State of the Art Report. Koblenz, 1991. 151 p.