

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

Географический факультет

Научно-исследовательская лаборатория эрозии почв
и русловых процессов имени Н.И. Маккавеева

ЭРОЗИЯ ПОЧВ И РУСЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ

Выпуск 20

Под редакцией профессора Р.С. Чалова

Географический факультет МГУ
Москва

2018

УДК 6.31.4: 55.3

ББК 26

Э74

Э74 Эрозия почв и русловые процессы // Тр. Науч.-исслед. лаборатории эрозии почв и русловых процессов имени Н.И. Маккавеева МГУ имени М.В. Ломоносова. Вып. 20. / Под ред. проф. Р.С. Чалова. М.: Географический факультет МГУ. 2018. 269 с.

Сборник представляет собой очередной выпуск трудов Научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов имени Н.И. Маккавеева МГУ. В статьях сборника приводятся результаты завершённых многолетних исследований, выполненных по госбюджетной теме НИР лаборатории, по грантам РФФИ и других фондов, госконтрактам и хоздоговорам. Рассматриваются как фундаментальные, так и прикладные проблемы учения об эрозионных и русловых процессах (эрозио- и русловедения). Ряд статей основываются на региональном материале, результатах экспериментальных исследований. Представляет интерес для гидрологов, геоморфологов, почвоведов, гидротехников, специалистов по водным путям, эрозионным и русловым процессам.

Сборник подготовлен по плану НИР (госзадание) научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева

Рецензенты:

доктор географических наук, профессор И.И. Рысин
кандидат географических наук О.А. Борсук

Печатается по постановлению Учёного совета географического факультета
Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

УДК 6.31.4: 55.3

ББК 26

ISBN

© Географический факультет МГУ, 2018
© Научно-исследовательская лаборатория эрозии почв
и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева, 2018
© Коллектив авторов, 2018

Научное издание

Эрозия почв и русловые процессы, вып. 20

Подписано в печать 2018. Заказ №

Формат 60x84/16. Усл. печ. л. 17. Тираж 100 экз.

ООО «Компания ПринтКов». 105064, г. Москва, ул. Земляной Вал, д. 7

А.С. Завадский, Д.В. Ботавин, П.П. Головлев, Л.А. Турыкин, Н.М. Михайлова, В.М. Морейдо, Е.А. Морозова, Е.В. Промахова, С.Н. Рулева

ВОДНЫЙ И РУСЛОВОЙ РЕЖИМЫ ДЕЛЬТОВОГО РУКАВА р. ГАНГ (ПАДМА) НА УЧАСТКЕ СТРОИТЕЛЬСТВА АЭС «РУППУР» (НАРОДНАЯ РЕСПУБЛИКА БАНГЛАДЕШ)¹

Введение

В апреле 2015 г. группой специалистов НИЛ эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Макавеева были выполнены комплексные гидрологические и русловые исследования на 50-километровом участке реки Ганг в пределах Народной Республики Бангладеш. Постановка исследований была связана со строительством АЭС «Руппур», возводимой при участии российской корпорации «Росатом». Основные объекты АЭС расположены на левом берегу главного русла реки Ганг (местное название – река Падма), в 80 км выше его слияния с Брахмапутрой. Реку здесь пересекает автомобильный мост Лалон-Шах (Lalon-Shah Bridge), построенный в 2001 г и соединяющий округа Пабна и Куштия. В 300 м выше по течению от него находится железнодорожный мост Хардинг-Бридж (Hardinge Bridge), построенный в 1915 г и названный в честь вице-короля Индии лорда Хардинга.

Природные условия района исследований определяются его расположением в крупнейшей дельтовой системе мира, которую формируют реки Ганг, Брахмапутра и Мегхна при впадении в Бенгальский залив (рис. 1).

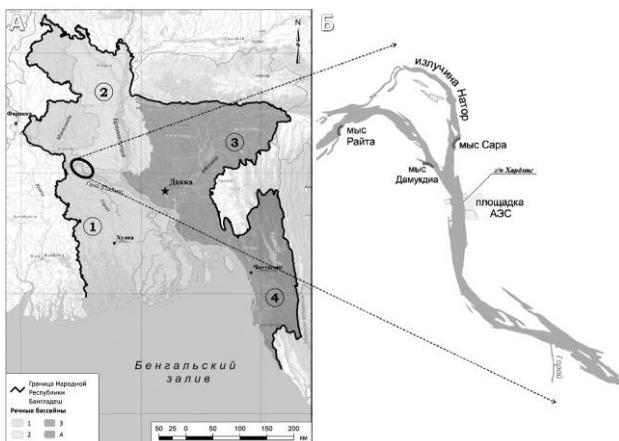


Рис. 1. Схема речных бассейнов на территории Народной Республики Бангладеш (А) и район проведения исследований (Б).

¹ Выполнено по плану НИР научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Макавеева при финансировании и технической поддержке АО «Атомэнергoproект»

Русловая сеть Ганга в дельтовой части имеет сложную структуру и гидрологический режим, связанный с влиянием, как рек, так и моря. Коэффициент густоты речной сети достигает $0,2 \text{ км/км}^2$, возрастая по направлению к ее морскому краю. Дельтовая область Ганга относится к субэкваториальному климатическому поясу и ландшафтной зоне приокеанских влажных лесов. Естественные ландшафты в северной части представлены также саваннами. Плодородные аллювиальные почвы с песчаным и глинистым субстратом, теплый климат и обильное увлажнение речными и дождевыми водами создают благоприятные условия для развития растительности – как естественных лесов, так и сельскохозяйственных культур. Средний годовой расход воды Ганга в вершине дельты (г/п Фарака) – $12,3 \text{ тыс. м}^3/\text{с}$ ($388 \text{ км}^3/\text{год}$). Этой величине соответствует модуль стока $13,6 \text{ л/(с}\times\text{км}^2)$; слой стока – 429 мм ; коэффициент стока $0,36$. Реки Ганг, Брахмапутра и Мегхна вместе приносят в дельту в среднем 1230 км^3 воды в год. На долю этих трех рек приходится соответственно $31,5$, $55,4$ и $13,1\%$ суммарного стока. С учетом боковой приточности к дельте их общий сток в Бенгальский залив достигает $1460 \text{ км}^3/\text{год}$ [Реки и озера мира, 2012].

Основной дельтовый рукав Ганга – Падма представлен разветвленно-извилистым руслом, шириной $1,5\text{-}3,0 \text{ км}$ с множеством песчаных отмелей. От главного рукава отходит большое количество протоков. Большинство из них в настоящее время имеют заиленные истоки и получают недостаточное питание. Протоки разделяются, сливаются друг с другом и вновь разделяются. При этом на отдельных участках имеют разные названия. Среди основных рукавов этой системы наиболее крупными являются Бхагиратхи-Хугли, Бхайраб и Горай. Горай, исток которого расположен в 17 км ниже строящейся площадки АЭС «Руппур», является наиболее крупным и многоводным и играет важную роль в обводнении западной части Республики Бангладеш.

В сезонных изменениях стока воды Ганга в нижнем течении выделяется два периода – влажный и сухой. Влажный обусловлен юго-западным муссоном и представляет собой летний паводочный период, продолжающийся на Ганге 4 месяца (с июня по октябрь). За это время проходит более 80% годового стока воды. Наиболее многоводный месяц – август. Сухой сезон длится с ноября по июнь. Минимальные расходы воды в дельтовой части Ганга составляют менее $1 \text{ тыс. м}^3/\text{с}$, максимальные в створе площадки строительства АЭС достигают $70\text{-}75 \text{ тыс. м}^3/\text{с}$. Обычно пиковые расходы воды на Ганге и Брахмапутре не совпадают по времени, но когда это происходит, в дельте происходят катастрофические наводнения. Так, в 1962 г максимальные расходы наступили одновременно и оказались равными $60,6 \text{ тыс. м}^3/\text{с}$ на Ганге и $68,2 \text{ тыс. м}^3/\text{с}$ на Брахмапутре; суммарный расход воды составил около $130 \text{ тыс. м}^3/\text{с}$ [Реки и озера мира, 2012]. За последние 30 лет было отмечено три катастрофических наводнения – в 1987, 1988 и 1998 гг., когда затопленными оказалось около 37% , 63% и 72% территории Народной Республики Бангладеш [Mirza et al., 2001].

Состав, методика и результаты натурных исследований

Полевые исследования были выполнены в период с 13 по 28 апреля 2015 г. Их результаты позволили получить представление о морфологических, гидравлических и динамических характеристиках русла реки Ганг (его основного дельтового рукава – р. Падмы) в условиях маловодной фазы водного режима.

Проведенные на подготовительной стадии рекогносцировочные маршруты обеспечили получение сведений о современном состоянии пойменно-руслового комплекса р. Падмы. Одной из основных задач было «увязать» данные анализа картографических материалов с натурными наблюдениями и откорректировать программу исследований с учетом реальной природно-антропогенной ситуации. Во время обследования поймы было проведено картирование береговой линии по степени проявления аккумулятивно-эрозионных процессов, дан анализ наиболее распространенных типов пойменной растительности, антропогенного преобразования пойменных ландшафтов, выявлены сооружения, оказывающие влияние на водный поток в русле и на пойме.

В состав инженерно-геодезических работ входило: планово-высотное обоснование, привязка к государственной геодезической сети, нивелировка продольных и поперечных морфостворов, измерение уклона водной поверхности. В Республике Бангладеш при проведении изысканий и картографировании территории используется прямоугольная система координат BUTM-2010, созданная инспекцией Бангладеша (SOB) как производная от проекции UTM для выполнения изысканий. В качестве высотной геодезической основы используется система счета высот от среднего уровня моря MSL (Mean Sea Level), определенная Тидальской обсерваторией в Читтагонге, где ведется непрерывный сбор данных с 1993 г.

Нивелировка морфостворов через пойму, прирусловые отмели, по гребням гидротехнических сооружений, насыпям автомобильных дорог, перегораживающих пойму с привязкой к действующей высотной сети проводилась для уточнения планово-высотных отметок, корректировки существующих топографических карт и последующего создания цифровой модели рельефа (ЦМР). Была выполнена нивелировка 68 морфостворов общей протяженностью около 200 км, измерено 740 планово-высотных отметок поверхности поймы, дамб, дорожных насыпей, бровок размываемых берегов.

Нивелировка водной поверхности была проведена 22 и 23 апреля 2015 г при относительно стабильном уровне воды. Средний уклон водной поверхности в пределах всего участка составил 0,03‰, что типично для приустьевых областей крупных рек в межень. По длине реки уклоны, как правило, возрастали в сужениях русла (до 0,06‰) и уменьшались в расширениях (до 0,015‰).

Гидрографические работы заключались в сплошных промерах глубин русла. Результатом стала карта руслового рельефа в масштабе 1:10 000.

Гидрологические работы. В многоводную фазу водного режима преимущественно широкопойменное русло р. Ганга-Падмы в районе строительства АЭС характеризуется чередованием разветвленных и относительно прямолинейных участков. Однако в период проведения исследований, когда на реке установились низкие уровни воды, весь поток был сконцентрирован практически на всем участке в едином русле. Исключением являлась бывшая еще два года назад основным руслом левобережная протока (излучина Натор). Весной 2015 г она была практически полностью перекрыта в своем истоке массивными песчаными побочными и по мере снижения уровней сток воды по ней прекратился.

Гидрометрические измерения расходов воды проводились на 8 створах. В качестве опорного был принят створ в районе действующего гидрологического поста (между мостовыми переходами Хардинг Бридж и Лалон-Шах Бридж). Измерения здесь были выполнены 21, 23 и 28 апреля. Результаты измерений сопоставлялись с данными, полученными ЗАО «Институт «Оргэнергострой» (ЗАО «ОЭС») в 2014 г при проведении режимных наблюдений за стоком воды в районе строительства АЭС «Руппур». Поэтому, для меженных уровней кривая $Q=f(H)$ хорошо обеспечена натурными данными (рис. 2). Однако реальная амплитуда изменения гидрологических характеристик на исследуемом участке на порядок превышает освещенный измерениями диапазон расходов и уровней. К сожалению, фактические измерения расходов воды в многоводную фазу водного режима являются разовыми и недостаточными для построения достоверной кривой $Q=f(H)$.

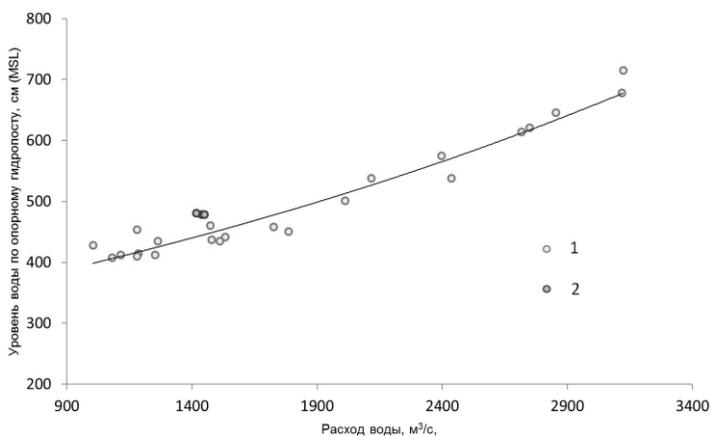


Рис. 2. График связи расходов и уровней воды на р. Ганг (Падма) (кривая $Q=f(H)$) в створе мостового перехода Хардинг по данным измерений ЗАО «ОЭС» в 2014 г (1) и МГУ в 2015 г (2).

Измерение скоростей и направления течения воды было проведено 23 апреля 2015 года в створе площадки строительства АЭС «Руппур» у мо-

ста Хардинг. По полученным данным были построены схемы скоростных полей потока – поверхностной (рис. 3), придонной и осредненной по вертикали.

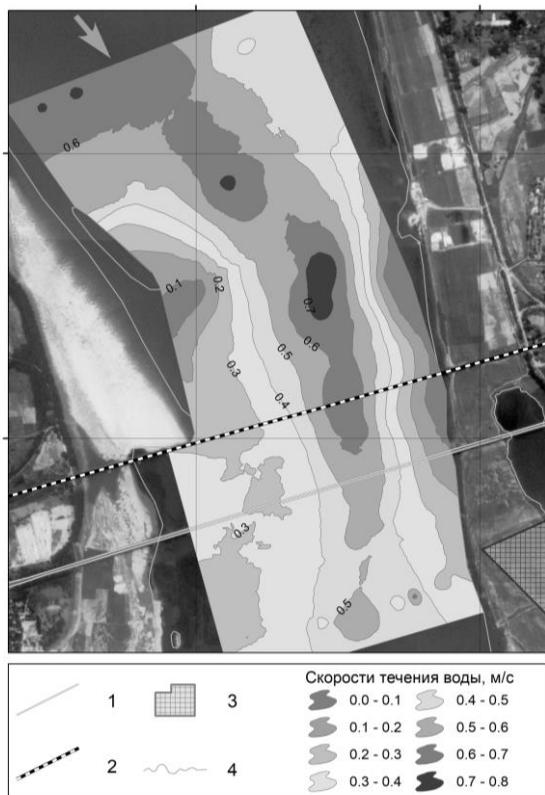


Рис. 3. Схема поверхностных скоростей течения воды р. Ганг (Падма) в створе строящейся площадки АЭС «Руппур» в меженный период: 1 – автомобильный мост Лалон-Шах; 2 – железнодорожный мост Хардинг; 3 – северо-западная граница строительной площадки АЭС «Руппур»; 4 – урез воды на дату проведения работ (23.04.2015 г).

Отбор проб донных (руслообразующих) наносов выполнен для определения их гранулометрического состава и анализа их пространственного распределения. Пробы отбирались по все длине участка (включая русло излуцины Натор) по поперечникам через 1000 м. На каждом поперечнике отбиралось от 4 до 7 проб. Всего взято 254 пробы донных отложений. Их обработка проводилась в камеральных условиях по стандартной методике, по соотношению фракций и величине среднего диаметра определялся тип наносов (табл. 1) в соответствии с классификацией, разработанной в МГУ [Чалов, 1994]. По материалам лабораторного анализа была составлена схема

распределения руслообразующих наносов в пределах исследуемого участка р. Падмы.

Для оценки стока взвешенных наносов 22-23 апреля параллельно с другими гидрологическими работам был осуществлен отбор 38 проб воды на 7 гидрометрических створах. Места отбора проб воды совпадают со створами, на которых проводились измерения расходов воды. Это позволило достоверно оценить суммарный сток взвешенных наносов и его изменение по длине участка. Одновременно в пределах одного гидрометрического створа отбиралось от 5 до 7 проб. Далее пробы перевозились в гидрохимическую лабораторию, расположенную на территории строительной площадки АЭС «Руппур», где проводилось определение весовой мутности воды с последующим расчетом стока взвешенных наносов.

Наряду с традиционным весовым методом фильтрования проб, который достаточно трудоемок и требует значительных временных затрат, использовался фотометрический метод с применением турбидиметров, основанный на способности взвешенных частиц в пробе рассеивать проходящий свет. Его применение осуществлялось параллельно с традиционным весовым методом, что позволило установить характер связи между весовой (S) и оптической (T) мутностью для меженного периода. В процессе лабораторного анализа было проведено 38 одновременных измерений S и T . В результате была получена расчетная зависимость, которая в дальнейшем может использоваться для оценки мутности воды S только по оптическим показателям T (рис. 4).

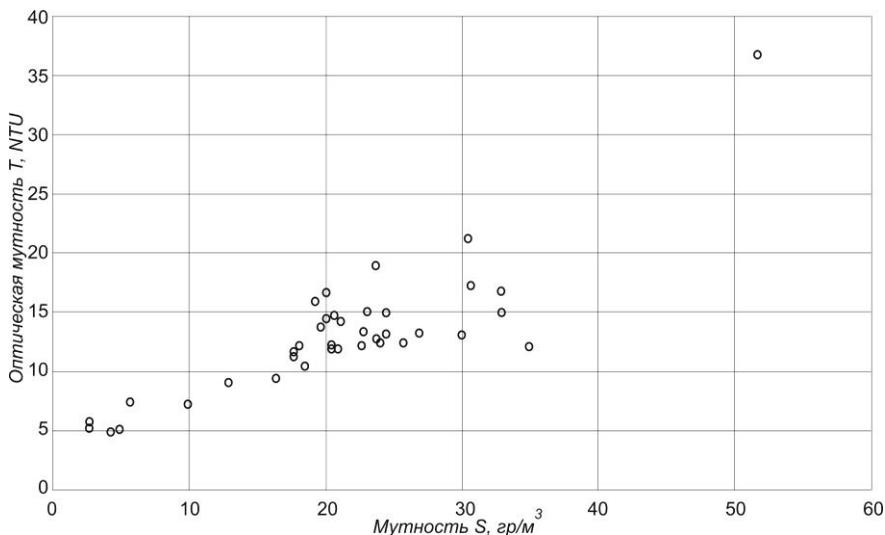


Рис. 4. Связь весовой и оптической мутности на р. Ганг (Падма) в межень 2015 г.

Полученные значения мутности воды невелики, что объясняется меженным периодом водного стока и малыми значениями уклонов водной поверхности. Минимальные значения концентрации в воде взвешенных частиц в пределах участка (5-7 г/м³) характерны для старого русла (излучина Натор), представляющего в условиях низкой межени старичное ответвление, соединяющееся в районе мыса Сара с главным руслом. Течение в нем при глубинах 30-40 м практически отсутствует, взвешенные частицы постепенно осаждаются на дно, приводя к его заилению. В основном русле концентрация взвешенных наносов в 3-10 раз выше и достигает 30-50 г/м³. Такие изменения величин мутности характерны как по длине основного русла, так и по отдельным створам. На участках подхода водного потока к размываемым береговым уступам мутность воды закономерно повышается, а в местах снижения скоростей течения происходит ее снижение.

Таблица 1. Распределение руслообразующих наносов
(в % от площади меженного русла)

Тип наносов	Подучасток			Весь участок
	Основное русло от мыса Райта до мыса Дамукдия	Старое русло (излучина Натор) и район мостовых переходов	Нижняя часть участка	
песок пылеватый и илы	19%	86%	31%	39%
песок тонкозернистый	6%	8%	12%	10%
песок тонкомелкозернистый	10%	5%	11%	9%
песок мелкозернистый	5%	---	22%	14%
песок мелкосреднезернистый	44%	1%	24%	24%
песок среднезернистый	16%	---	---	4%
Средний диаметр отложений, мм	0,21	0,08	0,15	0,16

Сопоставления измеренных значений мутности и расходов воды позволили вычислить расходы взвешенных наносов R в каждом гидрометрическом створе (табл. 2). Результаты проведенных оценок мутности и стока взвешенных наносов показывают, что, несмотря на меженное состояние русла в нем продолжают происходить русловые переформирования. Конечно, происходящие в межень деформации несопоставимы по масштабам переформирования русла в паводочный период, когда мутность воды увеличивается на 2 порядка (до 2100 г/м³ по данным наблюдений ЗАО «ОЭС» [Промежуточный отчет..., 2015]), перемещение песчаных гряд осуществляется на уровне макроформ руслового рельефа, а скорости размывов берегов достигают сотен метров.

Для определения морфометрических и динамических параметров грядовых форм руслового рельефа, определяющих сток влекомых наносов,

были выполнены наблюдения за движением мезоформ путем совмещения продольных эхограмм дна, полученных за разные даты.

Таблица 2. Измеренные расходы R и суточный сток взвешенных наносов W_R на гидрометрических створах в районе строительства АЭС «Руппур»

Дата отбора проб воды	Створ	Уровень воды по опорному водопосту, MSL (см)	Расход воды Q , м ³ /с	Средняя мутность s , г/м ³	Расход наносов R , кг/с	Сток наносов W_R , т/сут
22.04.2015	Верхняя граница участка	477	1400	28,9	40,5	3499
22.04.2015	Спрямоляющий излучину Натор рукав	477	1264	23,5	29,7	2566
22.04.2015	Створ площадки АЭС	477	1381	26,2	36,2	3128
23.04.2015	В 1 км ниже моста Хардинг	480	1303	21,8	28,4	2454
23.04.2015	Нижняя граница участка	480	1299	34,0	44,1	3810

Наблюдения проводились на ключевом участке в основном русле с четко выраженным грядовым рельефом в 8-9 км выше моста Хардинг (рис. 5). С этой целью была проведена серия эхолотных промеров по четко ориентированному продольному галсу. Промеры проведены 26 апреля в 11.00 и 28 апреля также в 11.00.



Рис. 5. Характерный грядовый рельеф русла на обсыхающем правобережном побочне в районе расположения ключевого участка.

Таким образом, интервал между наблюдениями составил 48 часов. Навигация при промерах осуществлялась с помощью спутниковой системы позиционирования в RTK-режиме, позволяющем обеспечить высокую (субметровую) точность прохождения промерного судна по фиксированной линии. Плановые отклонения по всему галсу не превышали 1 м. Донные отложения на ключевом участке образованы мелко- и среднезернистыми песками со средним диаметром частиц 0,2-0,3 мм. Средняя скорость тече-

ния в створе промерного профиля составляла 0,6 м/с. По данным промеров были построены совмещенные продольные профили дна (рис. 6), по которым определялись морфометрические параметры гряд и их динамические характеристики.

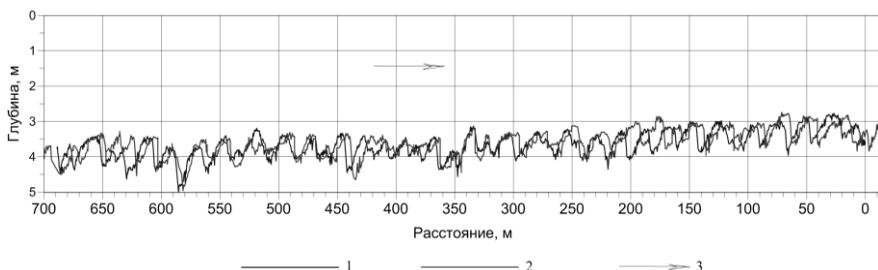


Рис. 6. Совмещенные продольные профили дна на ключевом участке: 1 – 26.04.2015 г (время 11-00); 2 – 28.04.2015 г (время 11-00); 3 – направление течения.

Измерения показали, что высота подвижных гряд h_T на период межени изменяется от 0,2 до 2,0 м, длина l - от 8 м до 48 м; средние значения: h_T – 0,7 м; l – 21 м. Коэффициент формы гряды (отношение площади продольного сечения гряды к площади прямоугольника со сторонами, равными высоте и длине гряды) составляет в среднем 0,6. Скорости смещения гряд изменяются в диапазоне 0,4-4,2 м в сутки, составляя в среднем – 2,5 м/сут. Была получена зависимость высоты подвижных гряд h_T от глубины потока (H) над ней (рис. 7), имеющая линейный характер и описываемая уравнением:

$$h_T = 0,02 + 0,21H$$

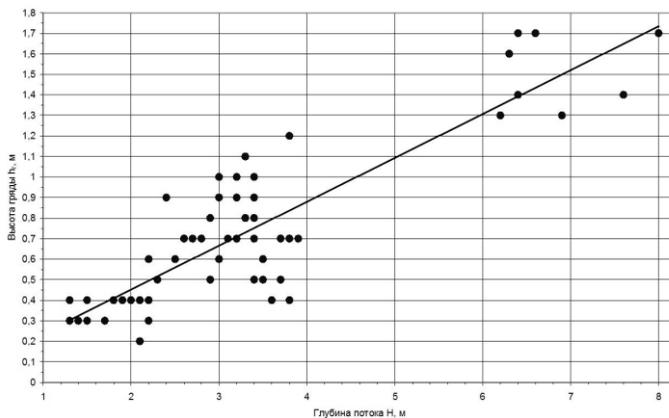


Рис. 7. Зависимость высоты гряд h_T от глубины потока H над ними.

Для расчета стока влекомых наносов использовался метод, разработанный на географическом факультете МГУ им. М.В.Ломоносова, учитывающий влекомую и взвешенную его составляющие, и метод Государственного гидрологического института (ГГИ) [СТО ГУ ГГИ 08.29-2009] для влекомых наносов. При этом влекомые наносы являются руслообразующими (РОН); по крупности к ним же относятся часть взвешенных наносов, крупность которых соответствует аллювиальным отложениям, слагающим речное русло. На исследуемом участке р. Падмы к руслообразующим относятся наносы крупнее 0,05 мм.

Расчет стока влекомых наносов по двум различным методикам дал относительно близкие результаты (табл. 3). В качестве окончательной величины следует принять их среднее значение, т.е. 20,9 млн. т/год. При соотношении $W_G/W_{РОН} = 0,62$ общий сток РОН составляет 33,6 млн. т/год.

Таблица 3. Результаты расчета стока руслообразующих наносов

Методика	Сток влекомых наносов, млн. т/год	Сток взвешенных РОН, млн. т/год	Общий сток РОН, млн. т/год
МГУ	18,7	11,5	30,2
ГГИ	23,0	-	-

Морфология и динамика русла р. Ганга (Падмы) на исследуемом участке

Вопросы морфологии и динамики русла Ганга в пределах Народной Республики Бангладеш практически не освещены в научной литературе. Интерес к русловым и гидрологическим процессам в нижнем течении Ганга стал проявляться только в последние 10-15 лет в связи с началом разработки проектных решений по строительству АЭС «Руппур». В 2000-2001 г Комиссией по атомной энергии Бангладеш (БАЕС) при содействии Института водного моделирования (SWMC, затем – IWM) был подготовлен технический отчет по обоснованию безопасности расположения площадки АЭС [Паводки, морфологические..., 2001]. В июле 2001 г Институт водного моделирования (IWM) составил отчет «АЭС «Руппур»: гидрологические, гидравлические и морфологические исследования» [Отчет по математическому..., 2001]. В 2011 г выпущен отчет по результатам математического моделирования (контракт между БАЕС и IWM) гидравлических процессов в створе площадки строительства АЭС [Mathematical Modelling..., 2011].

Современный пойменно-русловой комплекс реки Ганг (Падмы) представлен сложной иерархией аккумулятивных русловых форм и разновысотных пойменных ступеней, генезис и положение которых определялся циклами поднятия и опускания этой территории в геологическом прошлом, историей колебания уровня воды в Бенгальском заливе, многовековыми климатическими изменениями, а в последнее столетие также интенсивным хозяйственным преобразованием приречных территорий и антропогенной трансформацией водного режима рек бассейна Ганга. Мощная толща аллю-

виальных и дельтовых отложений, преимущественно песчаное и супесчаное строение береговых уступов определяют активные русловые переформирования. По некоторым оценкам [Rahman, 2010] средние скорости отступления береговых бровок р. Падмы в 80-90-е годы XX в. выше впадения р. Брахмапутры составляли 20-40 м/год, а ниже – 50-120 м/год. При этом максимальные значения на отдельных участках превышали 600 м/год (табл. 4).

Таблица 4. Береговая эрозия на р. Падма за 1984-1993 гг. [Rahman, 2010]

Участок реки		Выше устья р. Брахмапутры	Ниже устья р. Брахмапутры
Темпы береговой эрозии, м/год	Левый берег	20	38
	Правый берег	56	121
Максимальная скорость размывов берегов, м/год		665	620
Размыв берегов, га/год		2240	1800
Намыв берегов, га/год		1010	233

Не менее интенсивные русловые деформации, связанные с размывом берегов в процессе развития русловых форм, происходили в историческом прошлом. Имеющиеся картографические материалы XVIII-XX вв. позволяют проследить эволюцию русла р. Падмы выше слияния с р. Брахмапутрой (рис. 8).

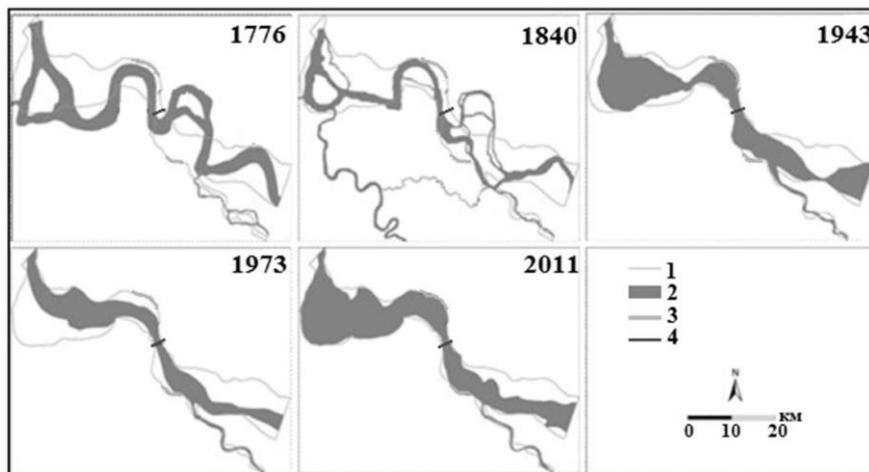


Рис. 8. Изменение конфигурации русла р. Ганг (Падма) с 1776 по 2011 гг. (1 – пояс меандрирования 1943–2011 гг.; 2 – русло реки (с песчаными побочными и низкой поймой); 3 – высокие уступы террас; 4 – мост Хардинг) [Nore et al., 2013].

В частности спрямление крупной излучины (в районе расположения АЭС «Руппур»), следы которой с настоящее время хорошо дешифрируются

на космических снимках (рис. 9), произошло на рубеже XVIII-XIX вв. Сформировавшееся при спрямлении излучины разветвление функционировало на протяжении XIX в., после чего основное русло сместилось в правую часть дна долины. Совмещение положения русла Падмы и основных ее пойменных проток за период 1973-2011 гг. подтверждают преимущественно правостороннее ее смещение ниже моста Хардинг.

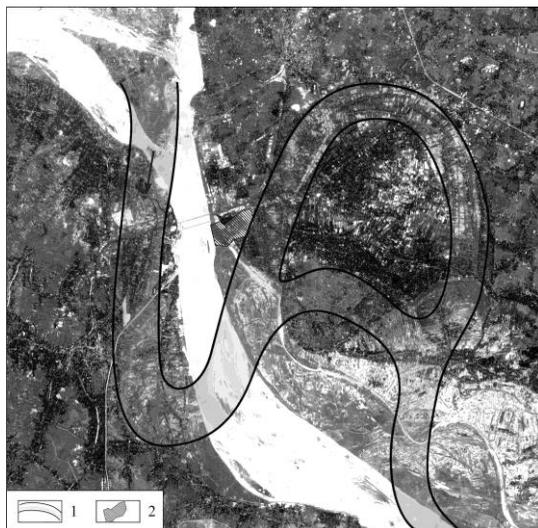


Рис. 9. Реконструкция положения русла р. Ганг (Падма) на участке строительства АЭС: 1 – русло Падмы в конце XVIII в.; 2 – площадка строительства АЭС.

Ретроспективный анализ имеющихся картографических материалов позволяет предположить, что до начала XX в. ширина пояса активных русловых переформирований на реке Падме превосходила современную амплитуду смещений русла от одного борта долины к другому. При этом преобладало меандрирующее русло, а ширина пояса меандрирования достигала 20 км. В современной морфологии русла р. Падмы при общих извилистых очертаниях преобладают разветвления. Основная причина такой трансформации морфодинамического типа русла связана, по-видимому, с антропогенным фактором. В настоящее время русло Падмы формируется в частично ограниченных условиях, где в роли ограничивающих факторов выступают защитные гидротехнические сооружения (противопагодковые и берегозащитные дамбы), а также высокие пойменные и террасовые уступы, полностью предотвращающие или замедляющие горизонтальные русловые деформации. В условиях их отсутствия современная долина Падмы расширяется до 10-20 км, в пределах которой русло формирует сегментные излучины или крупные пойменно-русловые разветвления. Такое четковидное из-

менение ширины пояса активных русловых переформирований характерно и для рассматриваемого участка Падмы, где суммарная ширина русла и поймы, подвергающейся практически ежегодному затоплению, изменяется от 1,6 до 18 км (рис. 10). Выше по течению расположено крупное (до 18 км) расширение дна долины Падмы, многолетние переформирования в пределах которого во многом определяют динамику русла на исследуемом участке.

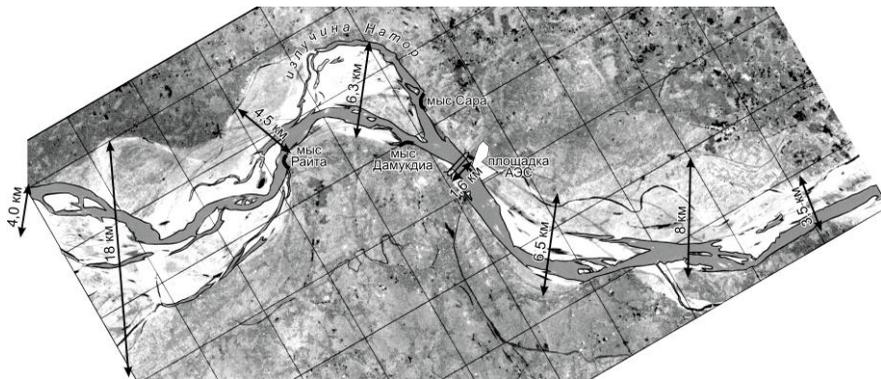


Рис. 10. Изменение ширины зоны активных русловых переформирований р. Ганг (Падма) по длине участка.

Влияние хозяйственной деятельности и существующих гидротехнических сооружений на русловый режим

Ведущим антропогенным фактором, определяющим динамику русла Падмы выше и ниже площадки строительства АЭС на современном этапе, стало строительство системы стабилизирующих русло гидротехнических сооружений, обеспечивающих защиту построенного в 1915 г. моста Хардинг (рис. 11).



Рис. 11. Мостовые переходы через р. Ганг (Падма) в районе площадки строительства АЭС (мост Лалон-Шах и мост Хардинг (на дальнем плане)).

Стоит отметить правильный выбор как места расположения створа перехода железной дороги через реку, так и стабилизирующих русло мероприятий. По данным отчета Центра моделирования поверхностных вод (SWMC) [Mathematical Modelling ..., 2011] при строительстве моста Хардинг одновременно были сооружены струенаправляющие дамбы, позволившие закрепить положение русла в створе мостового перехода, а также два укрепленных мыса: на правом берегу – мыс Райта (Raita) в 13 км выше по течению; на левом берегу – мыс Сара (Sara) в 4,5 км выше по течению. В 1931 г часть защитных сооружений в районе мыса Сара было разрушено вследствие развития левобережной протоки, в последствии трансформировавшейся в излучину Натор. Это привело к нарушению прямолинейности подхода потока к створу мостового перехода и смещению динамической оси потока к правому берегу с угрозой его размыва. Для предотвращения этого негативного процесса правый берег был дополнительно укреплен берегозащитной дамбой и сформирован новый (третий) «стабилизирующий» мыс – Дамукдиа (Damukdia). Таким образом, с начала 30-х годов XX века функционирует система из 3-х устойчивых к размыву береговых мысов (рис. 10), обеспечивающая прямолинейное положение русла при его подходе к мосту Хардинг, несмотря на интенсивные русловые переформирования выше и ниже по течению. Поэтому, когда встал вопрос о строительстве нового (автомобильного) моста, его местоположение было определено в 300 м ниже существующего железнодорожного моста. Вполне обоснованным выглядит и выбор места площадки строительства АЭС «Руппур». Хотя этот участок русла еще два столетия назад находился в зоне активных русловых переформирований, возведение комплекса гидротехнических сооружений привело к формированию устойчивого в многолетнем плане участка русла.

Наряду со стабилизирующими русло мысами Райта, Сара и Дамукдиа, вдоль русла р. Падма широко распространены системы берегозащитных сооружений. В настоящее время наиболее крупные берегозащитные работы проводятся вдоль левого берега в пределах излучины Натор. После катастрофических размывов берега на этом участке, когда в конце XX – начале XXI вв. потоком были уничтожены целые улицы вытянутых вдоль высокого террасового берега поселений (рис. 12-А), местными властями было принято решение о проведении капитальных берегозащитных работ. Сейчас на протяжении трех километрового участка идет строительство набережной, перекрывающей весь 15-20-метровый береговой склон бетонными плитами и мешками с песком (рис. 12-Б). Снижение эрозионной нагрузки вследствие спрямления излучины Натор позволяет надеяться на успешную реализацию этого проекта.

Еще целый ряд участков береговой линии вдоль русла на исследуемом участке укреплен массивной каменной наброской, которая вполне успешно выполняет свои функции. Такие участки примыкают к стабилизирующим мысам Райта, Сара и Дамукдиа, составляя с ними единый берегозащитный комплекс. Отдельные берегозащитные сооружения имеются в

створе мостовых переходов и вдоль правого берега выше ответвления рукава Горай. Общая протяженность берегозащитных сооружений составляет 12 км. Во всех случаях, стабилизация положения русла на отдельных участках оказывает значимую роль в многолетней динамике русла Падмы, зачастую играя определяющую роль.



Рис. 12. Излучина Натор (левый вогнутый берег): А – обрушение жилых домов; Б – современные берегозащитные мероприятия.

Развитие и поддержание широкой системы противопаводковых дамб является основой жизнедеятельности населения Народной Республики Бангладеш. В условиях ежегодного высокого подъема уровней воды в паводочный период на основных реках только противопаводковые дамбы и связанная с ними система шлюзов и каналов способны предотвратить затопления населенных пунктов, тяготеющих к рекам. В пределах исследуемого участка такая гидротехническая противопаводковая сеть развита достаточно хорошо. Значительная часть жилого фонда расположена ниже уровня ежегодного затопления, т.е находится ниже отметок противопаводковых дамб. Общая протяженность основных дамб, ограничивающих разлив воды р. Падмы во время летне-осеннего паводка (в районе площадки строительства АЭС) составляет 116 км. В большинстве случаев по их гребням проложены автомобильные дороги (асфальтовые и грунтовые).

Еще одним видом антропогенного вмешательства в естественный русловой режим реки на участке является разработка русловых карьеров. В первую очередь это приводит к трансформации руслового рельефа, способ-

ствуя изменению скоростного поля потока и формированию локальных зон глубинной эрозии и аккумуляции. Добыча песка в русле р. Падмы ведется в маловодную фазу водного режима в двух местах: ниже мостовых переходов и в районе истока протоки Горай. Технологически добыча песка осуществляется путем намыва малыми земснарядами водно-песчаной пульпы на специальные шаланды (малые суда). Информация об объемах добычи очень противоречивая и вряд ли достоверна. Результаты промерных работ 2015 г. позволили выполнить примерный расчет добытого песчаного материала на участке ниже мостовых переходов. За меженный период 2014-2015 г. (декабрь-март) было удалено из русла около 1,2 млн. м³ песка (почти весь объем добываемого песка используется для поднятия отметок строящейся площадки АЭС «Руппур»). Это привело к углублению русла на отдельных участках до 13,5-17 м при средней глубине по стрежню потока 4-5 м. Такая трансформация русла в меженный период способствует развитию регрессивной глубинной эрозии, которая может достигать опор нижнего из мостов (автомобильного моста Лалон-Шах). Однако в паводочный период суммарный объем переносимых потоком наносов на порядок превосходит объемы добычи песка. Все создаваемые в межень карьеры достаточно быстро заносятся наносами в половодье, восстанавливая естественный рельеф русла и нивелируя все возможные негативные последствия.

Изменения водного режима в нижнем течении р. Ганг стало отчетливо проявляться после сооружения низконапорной плотины Фаракка (Farakka Barrage) в Индии в апреле 1975 г. в 170 км выше створа строящейся АЭС. Основной задачей плотины является перераспределение стока воды в дельтовый рукав Хугли в сухой сезон года (с ноября по май) с целью обводнения г. Калькутты и снижения процессов заиления этого рукава. Проектный водозабор в рукав в течении сухого сезона составляет 1133 м³/с [Abbas, 1984]. Сооружение плотины Фаракка привело к уменьшению среднегодового минимального расхода воды в рукаве Падма на 60% (с 1932 до 770 м³/с); в результате меженная водность русла, пойменных рукавов и каналов ниже по течению снизились примерно на 50%, упал уровень грунтовых вод, ухудшилось качество поверхностных вод, стало происходить засоление дельтовых ландшафтов [Adel, 2002]. По данным [Mirza, 1997; 1998], ежегодный минимальный уровень воды снизился на 18% или на 1,12 м, в марте снижение составило 17%, в феврале – 15 %, в другие месяцы сухого сезона – около 12 %. Уменьшение среднемесячных расходов воды в сухой сезон изменялось от 14 до 54% по сравнению с периодом до 1975 г (табл. 5).

Однако перераспределение стока в рукав Хугли – не единственная причина снижения стока воды в Падме. Водозабор в регионах Индии, расположенных выше по течению [Hillary, 1979], привел к постепенному снижению водного стока (в нижнем течении Ганга) в 1850, 1900, 1963, 1980 и 1993 гг. в соотношении 4,45:3,70:3,51:2,18:1 соответственно [Adel, 2002]. В середине XX в. среднегодовой расход воды на посту около моста Хардинг был на 12 066 м³/с больше, чем на посту Фаракка, благодаря впадению при-

токов, например, Махананда (левый приток Ганга (Падмы) ниже плотины Фаракка), где сейчас на территории Индии также сооружены две плотины [Satter, 1996].

Таблица 5. Среднемесячные расходы воды на р. Падма – мост Хардинг [Mirza, 1998]

Характеристика		Средний расход воды (м ³ /с) за период (годы)		Отклонение, %
		1965–1974	1975–1992	
Сухой сезон	ноябрь	6 323	5 432	–14
	декабрь	4 039	2 741	–32
	январь	2 938	1 663	–44
	февраль	2 473	1 202	–51
	март	2 093	959	–54
	апрель	1 987	1 044	–47
	май	2 138	1 382	–35
Сезон муссонов	июнь	4 268	3 455	–19
	июль	15 955	19 025	19
	август	34 322	37 766	10
	сентябрь	31 944	37 761	18
	октябрь	14 921	15 896	7

Снижение меженных расходов при значительном стоке взвешенных наносов приводит к заилению русла, что проявляется в увеличении площадей аккумулятивных форм русла (побочней, осередков) в маловодную фазу водного режима. За период с 1973 по 1983 гг. площадь водной поверхности реки в межень сократилась на 19% [Elahee, Saleheen, 1992]. Рукав Горай в межень практически полностью пересыхает [Mirza, 1997].

После сооружения плотины Фаракка регулирование стока воды в реке осуществляется благодаря соглашениям между Индией и Бангладеш. В настоящее время действует 30-летнее соглашение, заключенное в 1996 г., однако оно не содержит никаких гарантий Индийской стороной по минимальным сбросам в нижний бьеф плотины Фаракка [Gain, Giurroni, 2014; Adel, 2002]. Хотя следует отметить, что наименьший сток воды в меженный период отмечался до подписания соглашения в 1976-1977 и 1988-1992 гг. [Mirza, 1997].

Русловые процессы р. Падма выше и ниже строящейся АЭС «Руппур»

При гидролого-морфологическом анализе, разработке прогноза плановых деформаций и оценке возможных русловых переформирований на отдельно взятом участке русла всегда необходимо учитывать сопряженность русловых деформаций, взаимосвязь процессов, происходящих выше и ниже по течению. В связи с этим, следует отметить особо значимую роль в русловых переформированиях на рассматриваемом участке русла р. Падмы процессов, происходящих выше по течению в пределах крупного (до 20 км) расширения дна долины от поселения Джаланги до мыса Райта (верхняя граница участка исследований). Поэтому анализ динамики русла р. Падмы

был последовательно проведен для трех сопряженных в своем развитии участков (рис. 13): расширение дна долины выше мыса Райта; от мыса Райта до моста Хардинг; ниже моста Хардинг до истока дельтовой протоки Горай.

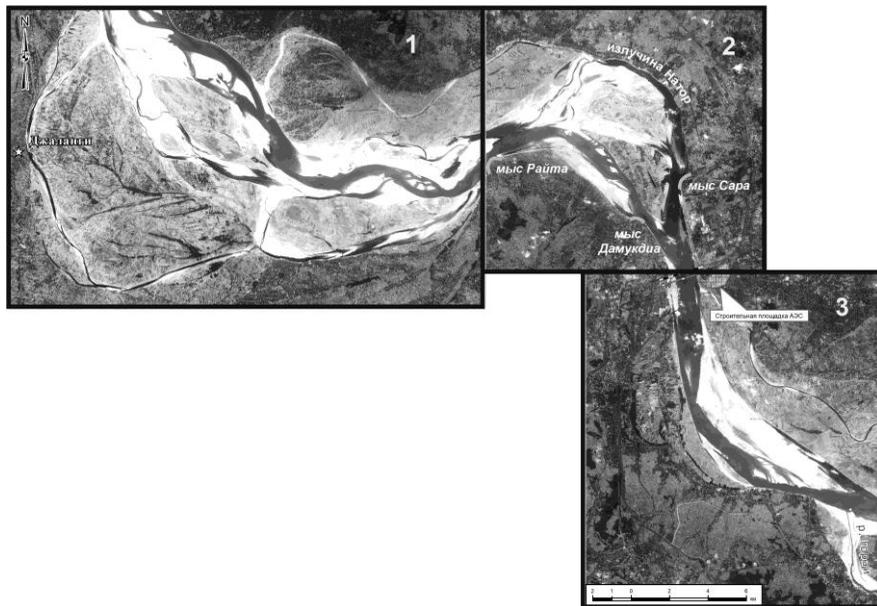


Рис. 13. Морфодинамически сопряженные в русловых переформированиях участки русла р. Ганг (Падма) в районе строящейся АЭС «Руппур» (основа – космический снимок 24.03.2015 г.).

За период, обеспеченный достоверным картографическим материалом и космическими снимками (1972-2015 гг.), на всех трех участках произошли существенные переформирования. На первом участке – выше мыса Райта – русло постоянно трансформируется, приобретая в разные отрезки времени то разветвленно-извилистую, то прямолинейную форму. В начале 70-х гг. XX в. оно образовывало пологую излучину, осложненную несколькими второстепенными, постепенно отмирающими протоками. При этом мыс Райта не оказывал непосредственного направляющего воздействия на поток. Излучина интенсивно развивалась и уже к 1977 г. представляла собой единую форму русла, охватывающую и второй участок, верхнее и нижнее крылья которой активно смещались вниз по течению со скоростью до 400 м/год (рис. 14). Постепенно излучина полностью сместилась на второй участок и ее привершинная часть расположилась у высокого левого берега, получив название «излучина Натор», а мыс Райта стал оказывать на поток все большее направляющее воздействие. Выше мыса Райта к 2000 г. сформировалась новая излучина (рис. 15), имеющая зеркальное отражение по

отношению к излучине 70-80-х гг. (с вершиной у правого берега). Этому способствовали переформирования русла выше по течению, где к этому времени основной поток сместился в левый рукав, представляющий собой еще в середине 1990-х гг. пересыхающую при низких уровнях ложбину.

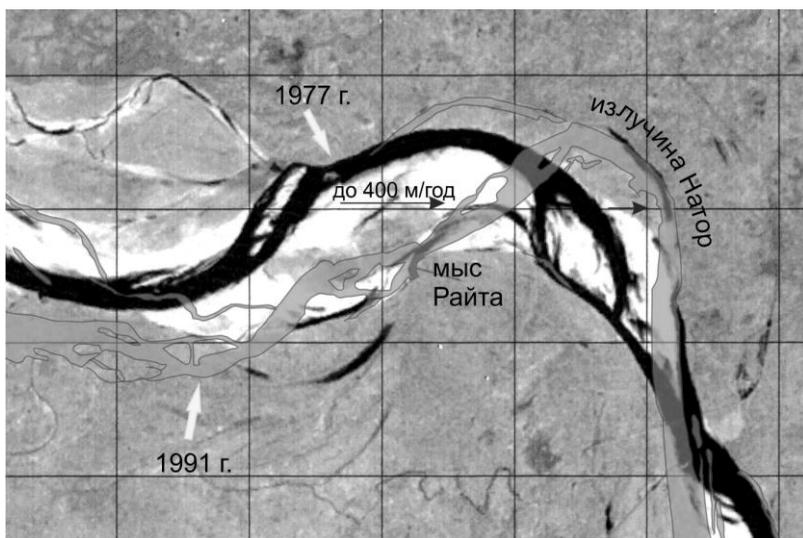


Рис. 14. Продольное смещение излучин русла и развитие излучины Натор с конца 70-х до начала 90-х гг. XX в.

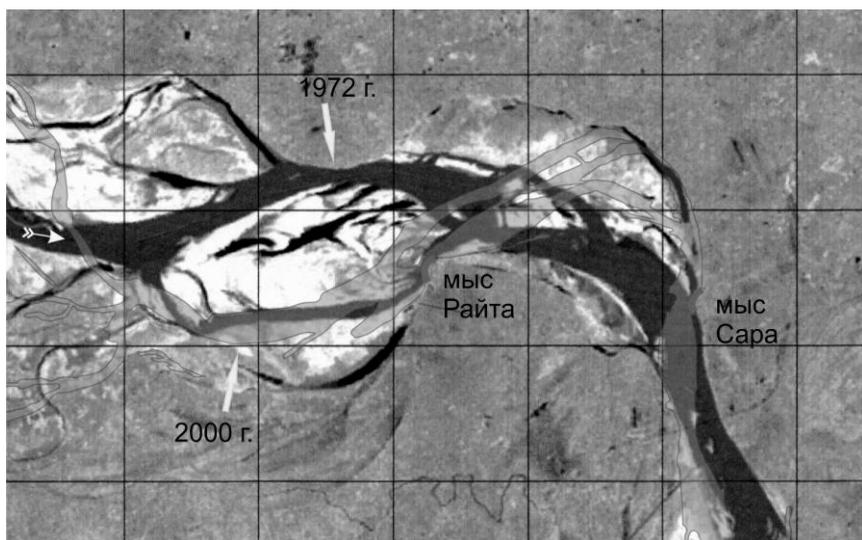


Рис. 15. Формирование излучины выше мыса Райта в начале XXI в.

Развитие новой излучины на первом участке привело к тому, что в 2000-2008 гг. русло расположилось вдоль правого «высокого» берега. В верхнем крыле излучины на подходе к правому берегу произошло ее искривление, и к 2005 г. здесь возникла спрямляющая протока. После 2008 г. дальнейшая эволюция излучины выше мыса Райта заключается в развитии спрямляющих рукавов и отмирании старого русла (рис. 16). В результате основное русло сместилось в центральную часть поймы и подходит к створу мыса Райта таким образом, что тот перестает оказывать на поток направляющее воздействие. К 2011 г. этот процесс окончательно завершился, но во вновь сформировавшемся русле на подходе к мысу Райта вследствие подпора от него периодически образуются вторичные разветвления и излучины. В настоящее время русло на первом участке расположено в центральной части пойменного массива и представляет собой систему из трех небольших сегментных излуцин, нижняя из которых сопряженно развивается с излучиной на нижележащем участке, определяя современные русловые переформирования в пределах второго участка.

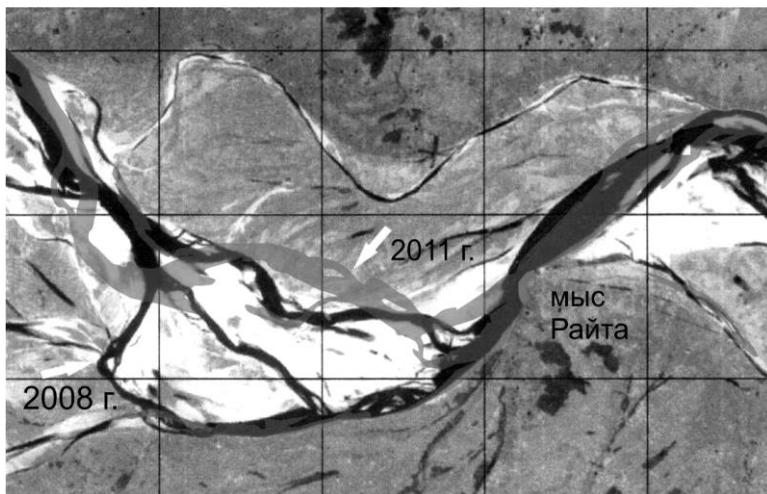


Рис. 16. Эволюция русла р. Ганг (Падма) на первом участке (выше мыса Райта) за 2008-2011 гг.

Развитие русла на втором участке в конце XX-начале XXI вв. связано с формированием и эволюцией излучины Натор. Ее переформирования ограничивались в нижнем крыле мысом Сара на левом берегу. Изменение параметров излучины за период 1972-2015 гг. можно проследить по данным, приведенным в таблице 6. К 1993 г. степень развитости излучины (I/L) увеличилась почти в 1,5 раза (с 1,39 до 1,83). При этом излучина в своей вершине достигла левого «высокого» коренного берега, который стал интенсивно размываться и за 1988-2014 гг. местами отступил на 300-350 м

(рис. 17); наибольшая скорость отступления была зафиксирована с 2005 по 2011 гг., составив в среднем 25 м/год. Конфигурация формы излучины Натор за последние 20 лет претерпела существенные изменения не только как следствие ее естественного развития, но и в связи с переформированиями на вышележащем участке. В частности, к 1995 г. в связи с активизацией направляющего воздействия на поток мыса Райта произошел размыв левого берега в верхнем крыле излучины и образование обширных отмелей возле правого выпуклого берега. Аналогичные изменения в русле отмечались в 2000-2005 гг.

Таблица 6. Изменения морфометрических характеристик излучины Натор за 1972-2011 гг.

Дата снимка	Радиус кривизны r , км	Шаг L , км	Длина l , км	Степень раз- витости l/L	Стрела прогиба h , км
23.11.1972	11,3	22,0	26,3	1,19	5,25
21.02.1973	11,1	24,0	27,5	1,15	6,00
28.03.1975	11,1	19,8	25,0	1,27	6,00
09.02.1977	6,25	18,0	25,0	1,39	7,25
21.02.1980	6,25	17,0	25,0	1,47	8,00
10.02.1988	7,25	15,0	25,0	1,67	8,75
02.02.1991	3,50	9,75	16,3	1,67	5,75
27.05.1992	3,50	9,75	17,5	1,79	6,00
23.02.1993	2,50	7,50	13,8	1,83	4,75
28.01.1995	4,25	10,3	15,0	1,46	5,75
01.01.1997	4,25	10,5	17,5	1,67	6,00
19.02.2000	3,50	11,3	17,5	1,56	6,25
24.02.2002	3,25	10,3	18,8	1,83	6,75
08.02.2005	4,00	10,5	17,5	1,67	6,25
17.02.2008	4,00	10,0	17,5	1,75	6,25
09.02.2011	4,00	10,3	17,5	1,71	6,75

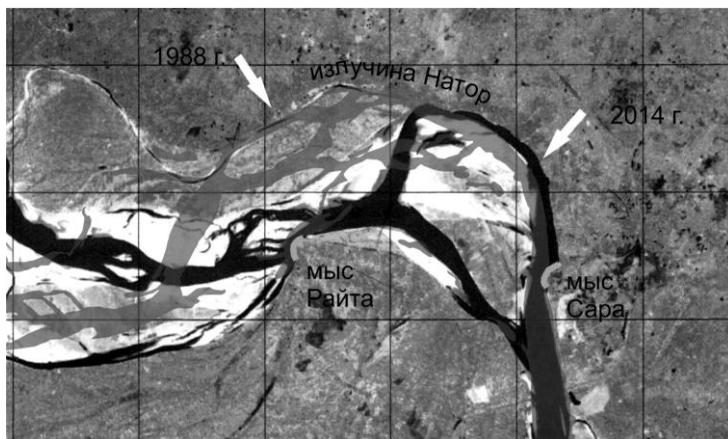


Рис. 17. Трансформация излучины Натор и отступление левого берега с 1988 г. по 2014 г.

В начале 2000-х гг. излучина Натор достигла критических значений степени развитости и постепенно утратила гидравлическую выгодность. Создались предпосылки для формирования спрямляющего рукава в тыловой части правобережного пойменного сегмента с выходом его на мыс Дамукдия. Этому способствовали переформирования русла в районе мыса Райта, приведшие к направлению потока на ложбину тыловой части правобережной поймы. Если в 2014 г. расход воды распределялся между излучиной и спрямляющим рукавом относительно равномерно, то к 2015 г. в маловодную фазу режима он полностью сосредоточился в спрямляющем рукаве, а русло в верхнем крыле излучины Натор было полностью занесено наносами (рис. 18). В результате выше моста Хардинг основное русло Падмы оказалось представлено относительно прямолинейным спрямляющим излучину Натор рукавом.

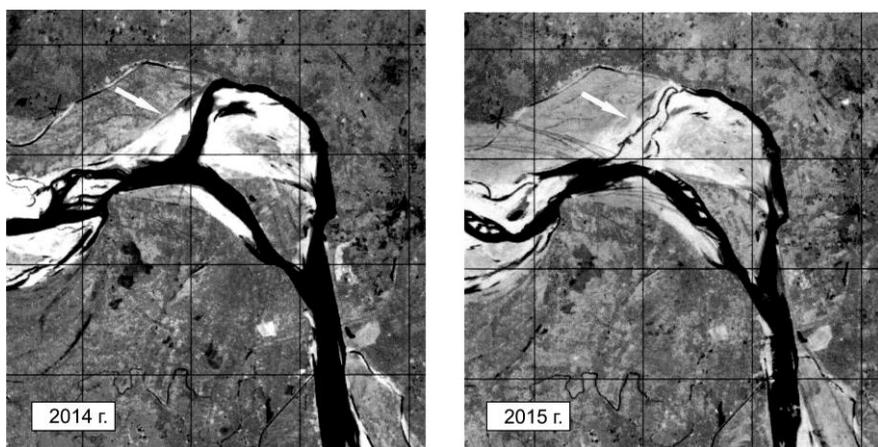


Рис. 18. Спрявление излучины Натор.

В настоящее время он начинает формировать новую пологую излучину, вершина которой интенсивно смещается влево, размывая высокий (до 7-8 м над меженным урезом) берег пойменного островного массива. Этот участок русла Падмы на современном этапе является наиболее активно развивающимся. С 2011 по 2017 гг. развитие спрямляющего рукава привело к его расширению и смещению в левобережную сторону, причем зона максимального размыва последовательно смещалась вниз по течению и в настоящее время располагается в нижней части рукава. Здесь только за 2011-2014 гг. размыв берега достиг 850 м, а за 2015-2017 гг. – более 1 км (рис. 19). При этом наиболее интенсивное смещение русла было отмечено при прохождении пика паводка с середины августа по середину сентября 2014 г. Размыв берега всего за один месяц здесь достигал 280 м, т.е. около 10 м/сутки. Процесс разрушения берегового уступа продолжается даже в маловодную фазу водного режима. Сопоставление космического снимка от 14.05.2015 г. с

результатами выполненной 24.04.2015 г. геодезической съемки береговой части позволили оценить скорость смещения берега, которая на отдельных участках за 20 дней составила 8-10 м (до 0,5 м/сутки).

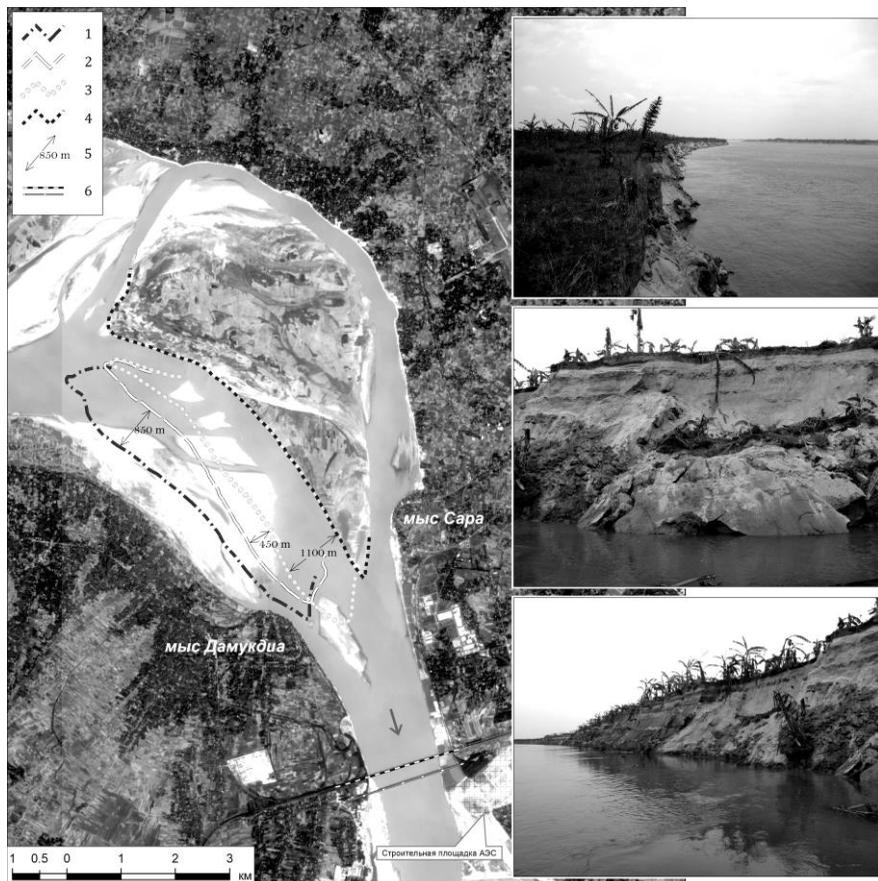


Рис. 19. Положение бровки левого берега спрямляющего рукава: 1 – 02.2011 г.; 2 – март 2014 г.; 3 – март 2015 г.; 4 – декабрь 2017 г.; 5 – участок и максимальное значение смещения бровки левого берега за разные временные интервалы; 6 – мостовые переходы (основа – космический снимок 01.12.2017 г.).

Активное развитие спрямляющего рукава хорошо иллюстрируют данные гранулометрического анализа донных отложений. На картосхеме руслообразующих наносов четко прослеживается вытянутая зона расположения наиболее крупных наносов, приуроченная к зоне максимальных скоростей потока и определяющая положение его динамической оси.

Наглядной иллюстрацией развития рукава, спрямляющего излучину Натор, является сопоставление поперечных профилей русла р. Падмы в 3 км выше моста Хардинг за 1990-2007 гг. (по данным SWMS [Паводки, морфологические аспекты..., 2010]) и 2015 г. (по материалам исследований МГУ) (рис. 20). Отчетливо виден масштаб разработки нового русла. По данным измерений в межень 2015 г. (апрель) в спрямляющем рукаве сосредотачивалось около 99% общего расхода воды р. Падмы. Во время прохождения паводочной волны происходит частичное перераспределение стока в пользу старого главного русла (излучина Натор), однако оно не столь существенно (хотя это требует инструментального подтверждения). О завершении цикла развития излучины Натор и ее превращении в старичное ответвление говорят и анализ донных отложений, которые представлены в настоящее время по всей ее длине заиленными пылеватыми песками и илами.

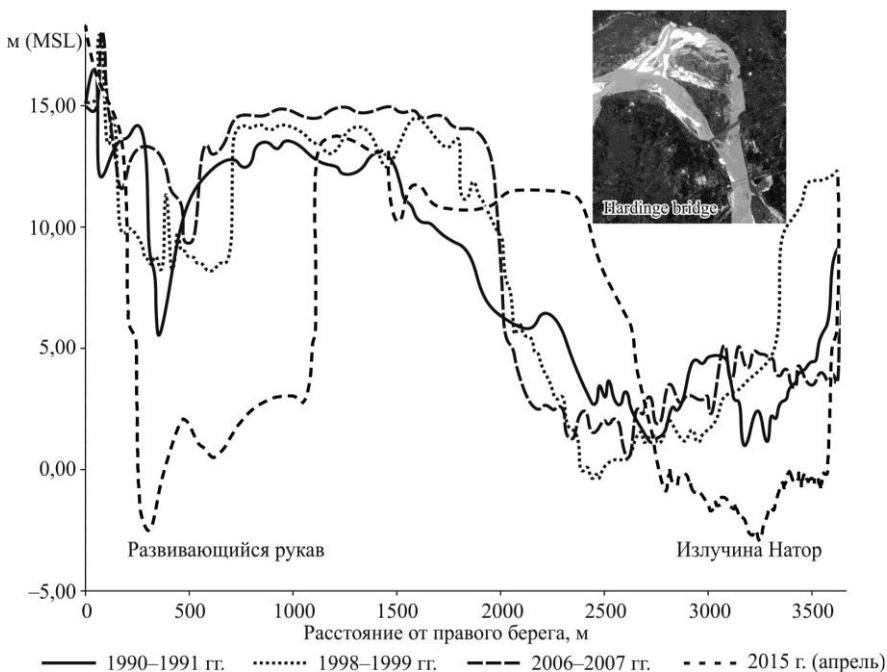


Рис. 20. Сопоставленные поперечные профили русла спрямляющего рукава излучины Натор в 3 км выше моста Хардинг за 1990-2015 гг.

В современных условиях нижнее крыло новой развивающейся излучины (спрямляющий рукав) опирается на один стабилизирующий русло мыс Дамукдиа, который направляет стрежень потока к левобережным устоям мостовых переходов и площадке строительства АЭС. Еще 4-5 лет назад основные расходы воды проходили по излучине Натор, динамическая ось

потока на выходе из излучины смещалась к правому берегу, а вдоль левого находилась устойчивая зона аккумуляции. В настоящее время ситуация поменялась на противоположную. Вдоль правого берега выше и ниже мостовых опор сформировалась из продуктов размыва развивающегося нового рукава широкая (до 300 м) песчаная отмель. С противоположной стороны активизировались эрозионные процессы, которые уже привели к смыву за 3 года крупного побочня у левого берега (рис. 21), от которого к 2015 г осталась только узкий вытянутый по течению остров, полностью смытый в 2016 г.

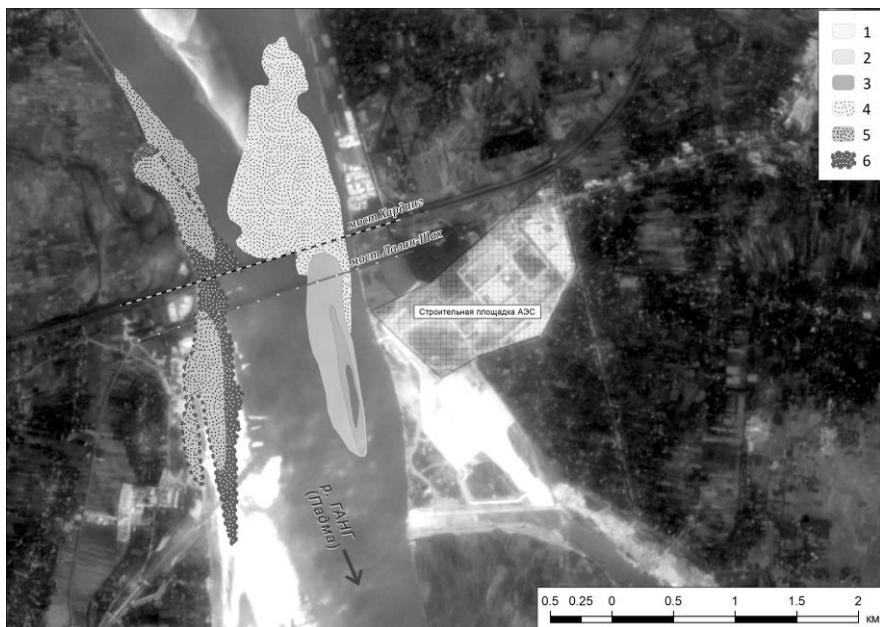


Рис. 21. Изменение русла в районе мостовых переходов вследствие смещения динамической оси потока от правого берега к левому. Конфигурация острова у левого берега: 1 – в 2011 г.; 2 – в 2014 г.; 3 – в 2015 г. Положение побочня: 4 – в 2011 г.; 5 – в 2014 г.; 6 – в 2015 г. (основа – космический снимок 10.01.2018 г.).

Обобщая собранную информацию о динамике русла Падмы на 1-м и 2-м участках, можно говорить о двух разновременных вложенных друг в друга циклах переформирований русла выше створа строительства АЭС. Короткий цикл связан с развитием излучины между мысами Райта и Сара. По времени он охватил период с начала 90-х гг. XX в. и продолжался 25 лет, когда произошло спрямление излучины Натор. Эти переформирования накладываются на более продолжительные циклы развития русла, охватившие весь участок. Последний из них начался в середине 70-х гг. XX в., ко-

гда сформировались излучины между двумя сужениями (выше мысов Райта и Сара). Продолжительность его превышает 50 лет. При этом переформирования в течении этого большого цикла, по-видимому, зависят от переформирований вышележащего разветвленного участка, расположенного в 45 км выше моста Хардинг у г. Раджшахи. Последние определяют развитие левого (современного), либо правого (1960-1970 гг.) положений русла выше мыса Райт. Таким образом, состояние русла в районе строящихся сооружений АЭС «Руппур» определяется переформированием реки выше по течению. Выбор площадки АЭС в отношении русловых деформаций следует признать оптимальным, что подтверждается устойчивым в многолетнем плане состоянием мостовых переходов.

Переформирования русла на третьем участке также зависят от деформаций, происходящих выше по течению, хотя они определяются устойчивым в плане положением берегов (мостовыми переходами) между вторым и третьим участками. Здесь происходит только миграция динамической оси потока по ширине русла без общего его смещения.

В начале 70-х годов XX века, когда еще не началось развитие излучины Натор, поток Падмы ниже моста Хардинг направлялся к левобережной пойме, следуя параллельно его современному положению и постепенно смещаясь к заходу в рукав Горай. В 2,6 км выше его перед мысом правого берега существовал остров, возле которого главное течение реки уходило в левый рукав. Ниже захода в протоку Горай русло делало пологий изгиб, оставаясь далее относительно прямолинейным (рис. 22).

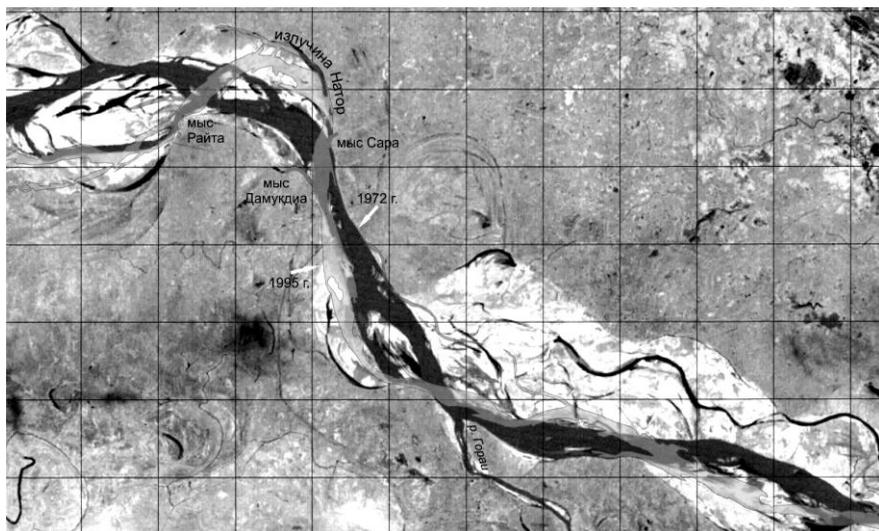


Рис. 22. Изменение положения русла р. Ганг (Падма) с 1972 г по 1995 г.

По мере развития на втором участке излучины Натор русло постепенно смещалось вправо и за 1972-2015 гг. величина смещения составила 1,5 км. На месте старого русла образовался крупный пойменный массив, в тыловой части которого следы бывшего русла сохранилась в виде неширокой пойменной протоки. В итоге, в 2010-2012 гг. левый берег непосредственно ниже мостов в районе площадки АЭС и захода во второстепенную пойменную протоку (в которую предварительными проектными решениями предусмотрен водовыпуск АЭС) оказался в зоне аккумуляции наносов и был перекрыт зарастающими отмелями.

Ситуация изменилась в последние 2-3 года с началом развития спрямляющего излучину Натор рукава. Уже в 2014 г., когда одновременно функционировали старое (излучина Натор) и новое (спрямляющий рукав) русла, и тем более в 2015 г., когда старое русло в истоке полностью обмелело, превратившись в межень в длинный залив, в створе мостовых переходов произошло смещение динамической оси потока к левому берегу. Отмели и часть высокой (до 4-5 м) поймы были размыты, и к 2015 г. от них остался только небольшой остров. Ниже мыса Дамукдиа вдоль правого берега сформировался песчаный побочень, коса в ухвостье которого прослеживается на протяжении 3 км ниже автомобильного моста. Развитие спрямляющего рукава излучины Натор, очевидно, стабилизирует русло в районе площадки АЭС, обеспечивая подход потока к левому берегу. Последнее может стать причиной активизации развития левобережной пойменной протоки ниже створа АЭС, заход в которую в настоящее время перекрыт песками.

Формирование крупных отмелей, преимущественно в левобережной части русла, сопровождается в пределах нижнего (третьего) участка размывами правого берега, что подчеркивает общую тенденцию смещения русла вправо. Размывы берегов здесь происходят со средними скоростями 5-15 м/год. Однако, местами размывается и левый высокий пойменный берег, что наиболее отчетливо проявляется в районе захода в рукав Горай. Этому благоприятствует шахматное расположение побочней перекатов, способствующее смещению стрежня потока к левому берегу. В последние 10 лет он размывался со средней скоростью 20-30 м/год. Возвращение динамической оси потока к правому берегу происходит уже ниже захода в рукав Горай, где берег отступает со средней скоростью 60 м/год (за период 2014-2015 гг. – до 150 м/год).

Устойчивая зона аккумуляции наносов находится на заходе в рукав Горай. Это важный в хозяйственном отношении водный объект, снабжающий водой юго-восточные регионы Республики Бангладеш. Забор воды в меженный период в последние годы все больше осложняется из-за происходящих в русле переформирований, связанных со смещением динамической оси потока в сторону левого берега, откуда она возвращается уже ниже захода в рукав, в то время как непосредственно возле него формируется массивный песчаный побочень (рис. 23).

Перекаты и их роль в современной динамике русла р. Падма

Важную роль в эрозионно-аккумулятивных процессах на р. Падме играют макроформы руслового рельефа – перекаты, расположение и многолетняя динамика которых определяют положение размываемых берегов и места аккумуляции наносов. Морфологически перекаты являются крупными аккумулятивными формами, представленными массивными песчаными побочными в прибрежной части и вытянутыми мелководными участками (гребнями), пересекающими меженное русло. Побочны у противоположных берегов обычно смещены друг относительно друга, приводя к тому, что соединяющие их гребни располагаются под углом к геометрической оси русла, оказывая направляющее воздействие на водный поток.

В настоящее время на рассматриваемом участке русла Падмы насчитывается восемь крупных перекатов (рис. 24). Число и расположение перекатов тесно связаны с формой основного русла р. Падмы (рис. 25). В период активизации развития излучины Натор перекаты располагались в верхнем и нижнем крыльях излучины, а также в ее вершине. Это находило отражение в формировании протяженной зоны аккумуляции наносов вдоль левого берега выше створа мостового перехода Хардинг. При развитии спрямляющего излучину Натор рукава крупные перекаты образовались в его центральной и нижней части, что способствовало аккумуляции наносов вдоль правого берега выше и ниже мостовых переходов, а также смещению динамической оси потока в левобережную часть русла. Ниже по течению перекаты располагаются в шахматном порядке, ежегодные изменения в морфологии которых определяются условиями прохождения паводков (их продолжительностью, амплитудой колебания уровней). Это приводит к постепенному изменению положения зон аккумуляции и размыва, хотя эрозионные процессы преобладают вдоль правобережной части русла, в то время как левобережная в основном выступает в качестве зоны транзита влекомых наносов.

Прогнозные оценки горизонтальных русловых деформаций

Анализ происходящих с конца 40-х г. XX в. русловых переформирований на р. Падма и выделение нескольких «вложенных» друг в друга временных циклов с учетом антропогенных преобразований руслового и водного режимов позволил обосновать несколько сценариев дальнейшего развития русла. Ключевыми моментами при разработке прогноза на ближайшие годы являются наличие или отсутствие берегозащитных сооружений в районе строительства АЭС «Руппур» и характер смещения основного русла в районе мыса Райта.

Вариант А. При отсутствии крепления левого берега у площадки строительства АЭС

Сценарий А-1. При активном в течение ближайших 5 лет смещении потока в створе мыса Райта к левому берегу и экстремальном проявлении горизонтальных деформаций в районе площадки строительства АЭС конфигурация русла может оказаться близкой к существовавшей в 1972 г (рис. 26, А-1).

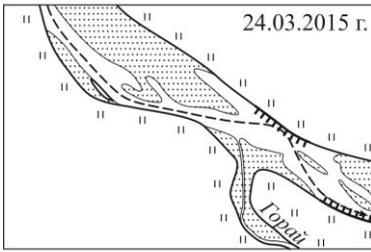
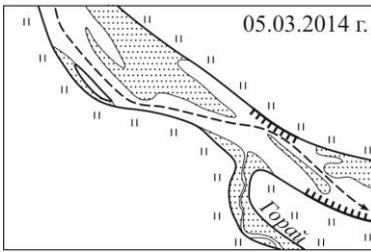
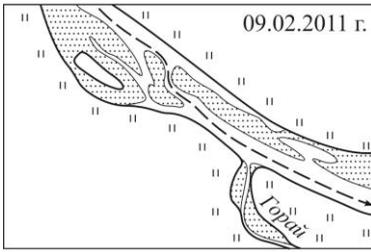


Рис. 23. Русловые переформирования в районе захода в рукав Горай за 2011-2015 гг.: 1 – песчаные побочники и осередки; 2 – высокая пойма; 3 – размываемые берега; 4 – динамическая ось потока (при низких уровнях).

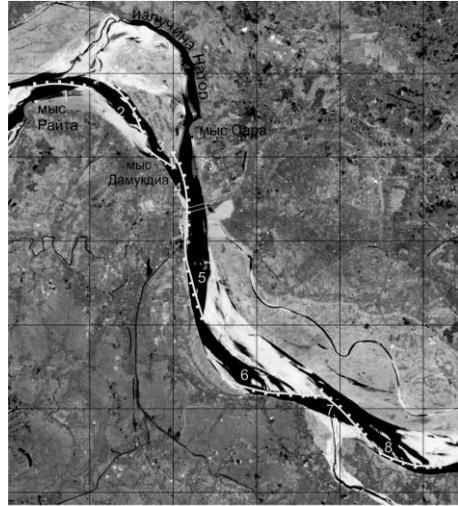


Рис. 24. Расположение гребней перекатов на исследуемом участке русла р. Ганг (Падма).

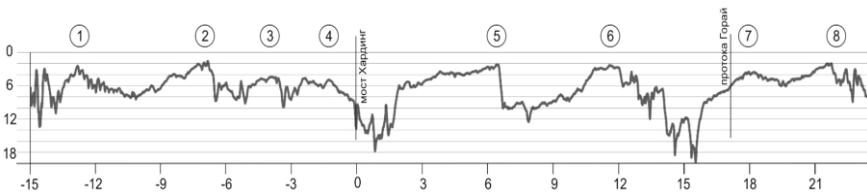


Рис. 25. Продольный профиль дна р. Ганг (Падма) вдоль стрежня потока вверх и вниз от моста Хардинг (0 км): цифры – номера перекатов; отметки дна приведены в метрах от водной поверхности в межень.

В таком случае левобережный пойменный массив ниже автомобильного моста Лалон-Шах будет размыт; соответственно строительство здесь водозаборных и водосбросных сооружений АЭС «Руппур» будет невозможно, либо потребует изменения общей концепции их расположения.

К 2025 г. выше по течению начнется формирование новой излучины (аналог современной излучины Натор), по мере развития которой на протяжении последующих 15 лет (до 2040 г.) мыс Сара будет направлять поток к противоположному берегу (к мысу Дамукдиа). В результате в створе мостовых переходов Хардинг и Лалон-Шах и выше правый берег будет находиться в зоне активного воздействия водного потока, в то время как левобережье в районе площадки строительства АЭС окажется в зоне устойчивой аккумуляции наносов.

Сценарий А-2. При сохранении современного положения русла в районе мыса Райта, последний будет оказывать направляющее воздействие на поток. К 2020 г. большая часть островного массива, разделяющего спрямляющий рукав и старое русло (излучину Натор), будет размыта. Сформируется излучина спрямляющего рукава. Левый берег в районе площадки АЭС останется в зоне активных русловых переформирований. По мере увеличения кривизны новой излучины, динамическая ось потока сместится к правому берегу и ниже мыса Дамукдиа, активизируется его размыв. В свою очередь левобережная часть русла в районе площадки строительства АЭС окажется в зоне аккумуляции наносов. К 2040 г. излучина спрямится, начнет разрабатываться новый спрямляющий рукав (аналогичный современному спрямлению излучины Натор), вновь активизируются эрозионные размывы левого берега, создавая угрозу приречным сооружениям АЭС.

Сценарий А-3. Если к 2020 г. русло выше мыса Райта вплотную сместится к правому берегу ниже по течению следует ожидать перераспределение стока воды в старое русло – излучину Натор и постепенное снижение роли современного спрямляющего рукава. В результате описанный выше цикл развития русла увеличится на 5 лет с сохранением периодичности формирования зон эрозии и аккумуляции в створе современных мостовых переходов.

Вариант Б. При укреплении левого берега в районе строительной площадки АЭС

Сценарий Б-1. Если до 2020 г. сохранится современное положение русла в створе мыса Райта и направляющее воздействие последнего на водный поток, островной массив между излучиной Натор и спрямляющим рукавом будет активно размываться, формируя новую излучину. К 2020 г. ширина острова уменьшится на 1-1,5 км, будет размыт левобережный остров ниже автомобильного моста Лалон-Шах. Активизируются размывы левого берега между мысом Сара и железнодорожным мостом и правого берега ниже площадки АЭС, чему будет способствовать отклонение сюда динами-

ческой оси потока под влиянием берегозащитных сооружений у площадки АЭС (рис. 27, Б-1).

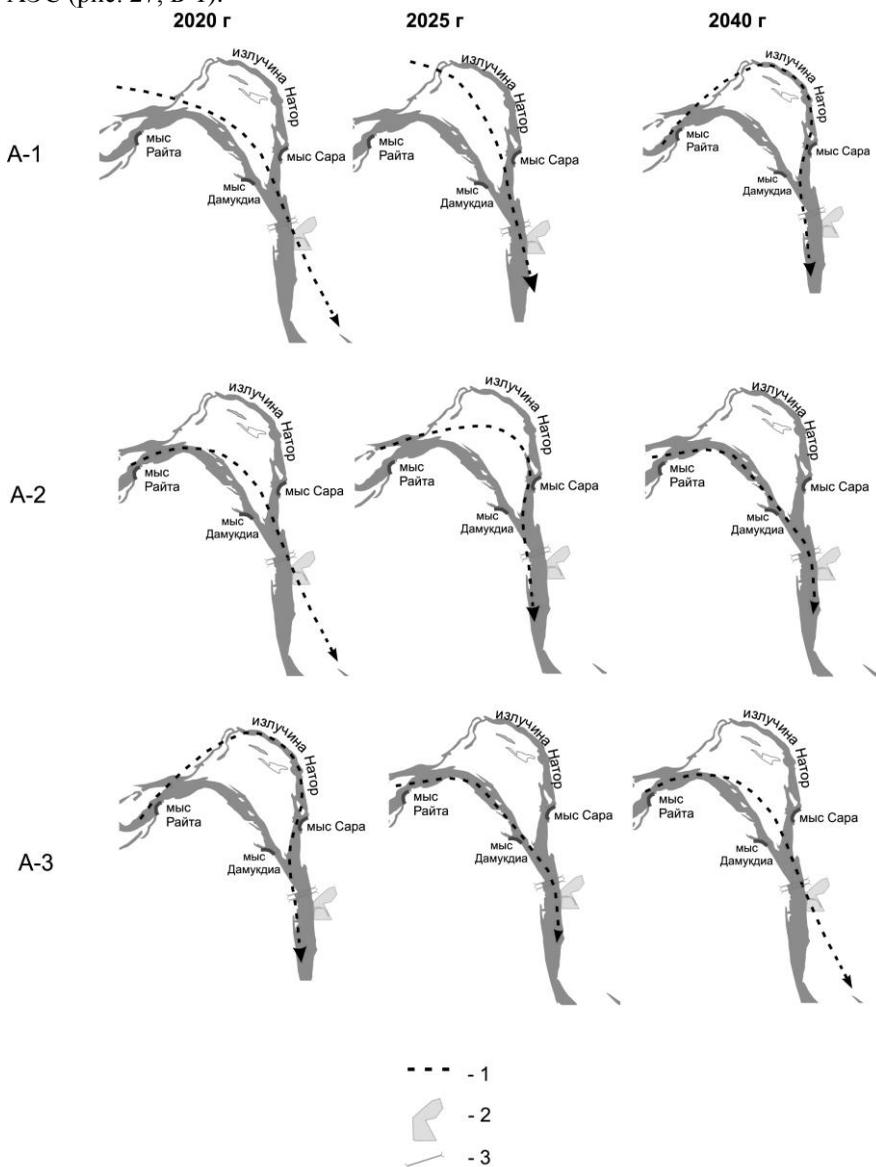


Рис. 26. Прогнозная оценка развития русла р. Ганг (Падма) в районе строительства АЭС. Вариант А. Сценарии А-1, А-2, А-3.

1 – прогнозируемое положение стрежня потока; 2 – строительная площадка АЭС; 3 – мостовые переходы.

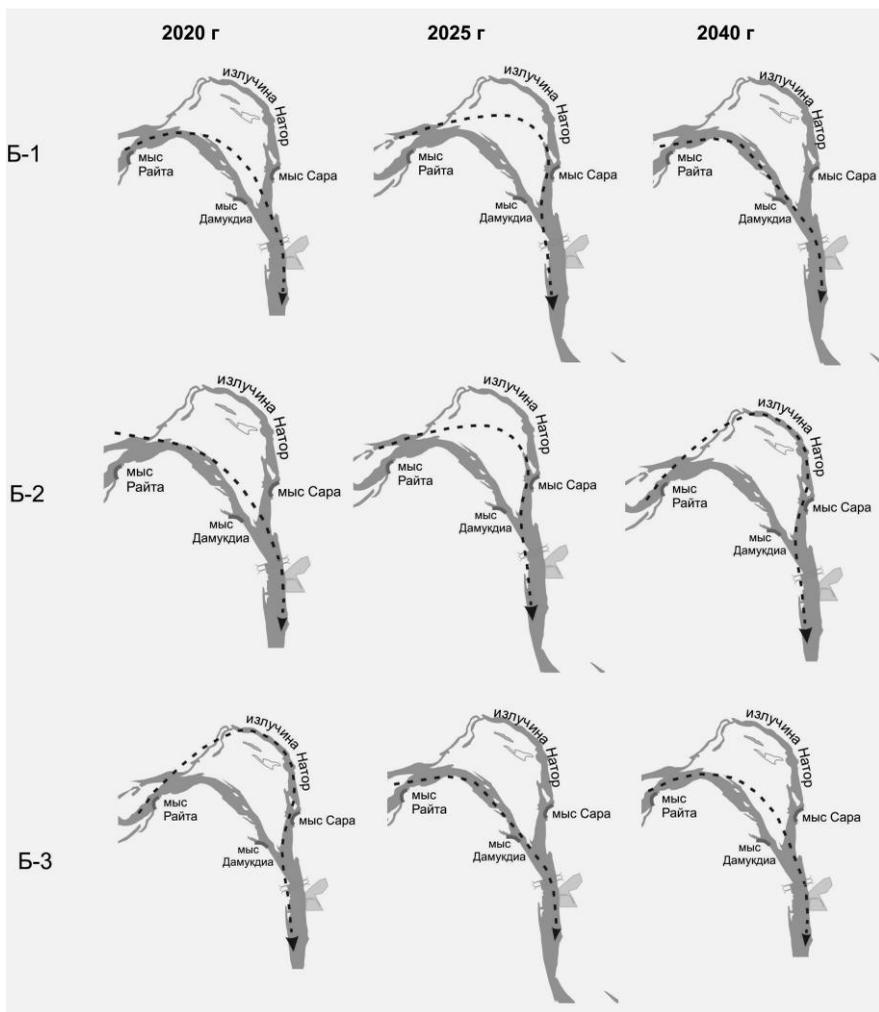


Рис. 27. Прогнозная оценка развития русла р Ганг (Падма) в районе расположения площадки строительства АЭС. Вариант Б. Сценарии Б-1, Б-2, Б-3. Условные обозначения на рис. 26.

К 2025 г. по мере развития излучины поток окажется под направляющим воздействием мыса Сара. Восстановится излучина Натор, однако дальнейшего ее искривления не произойдет из-за выполняемых здесь берегоукрепительных работ. Выше мостовых переходов размыв левого берега прекратится, стрежень потока в районе площадки АЭС сместиться к правому берегу, а вдоль площадки АЭС сформируется устойчивая зона аккумуля-

ляции наносов. За последующие 15 лет крупный побочень у выпуклого берега излучины будет активно зарастать, и к 2040 г. сформируется пойменный массив. Тем не менее из-за кривизны излучины, близкой к критической, вновь создадутся условия ее спрямления. Динамическая ось потока снова вернется к левому берегу, однако возведенные здесь берегозащитные сооружения будут препятствовать его размыву.

Сценарий Б-2. При смещении в ближайшие 2-3 года потока в створе мыса Райта к левому берегу, как это было в 70-е гг. XX в., развитие излучины спрямляющего рукава замедлится, русло станет относительно прямолинейным, направленным в сторону левого берега в районе мостовых переходов и площадки АЭС. К 2020 г. у площадки АЭС возле возведенных здесь берегозащитных сооружений сформируется плесовая лощина. Их направляющее воздействие приведет к активизации размывов правого берега вплоть до захода в рукав Горай. При дальнейшем смещении потока выше мыса Райта к правому берегу (в период 2025-2040 гг.) будет происходить развитие излучины Натор, сопровождаемое переформированиями, подобными описанными по сценарию Б-1) с соответствующей временной задержкой (рис. 27, Б-2).

Сценарий Б-3. Аналогичен сценарию А-3, но цикл развития русла сократится на 5 лет с сохранением периодичности формирования зон эрозии и аккумуляции в створе современных мостовых переходов.

Таким образом, при всех сценариях переформирования русла в районе строящейся АЭС (в створе современных мостовых переходов) аккумуляция наносов будет происходить то у левого, то у правого берега; соответственно будет смещаться стрежневая зона потока, вызывая размыв русла у противоположных берегов. Следует иметь в виду, что увеличение водности (прохождение паводков малой обеспеченности, серия многоводных лет) может ускорить период развития и спрямления излучины выше площадки АЭС. Напротив, маловодные гидрологические циклы будут этот процесс замедлять.

ЛИТЕРАТУРА

Паводки, морфологические аспекты реки и безопасность. Исследование на основе математического моделирования // SWMC. Комиссия по атомной энергии Республики Бангладеш. 2001.

Проведение нулевого цикла наблюдений на геодинамическом полигоне. Технический отчет. АЭС «Руппур». Энергоблоки 1, 2. Предпроектная документация. ЗАО «Институт «Оргэнергострой». 2014.

Промежуточный отчет по результатам выполнения инженерно-гидрометеорологических изысканий. RPR-ES-BDD0050. 2015.

- Реки и озера мира. Энциклопедия. М.: Энциклопедия. 2012.
- СТО ГУ ГГИ 08.29-2009. Учет руслового процесса на участках подводных переходов трубопроводов через реки. – СПб.: Нестор-Истрия, 2009.
- Указания по расчету стока наносов. ВСН 01-73. Л.: Гидрометеоздат. 1974.
- Чалов Р.С. Русловые исследования. Изд-во МГУ. 1994.
- Abbas, N., Subramanian, V.* Erosion and sediment transport in the Ganges River basin, India // *J. Hydrol.* 1984. 69. P. 173–182.
- Adel, M.M.* Man-made climatic changes in the Ganges basin // *Int. J. Climatol.* 2002. 22. P. 993–1016.
- De Villiers M.* Water Wars: Is the World's Water Running Out? // Weidenfeld & Nicolson: London. 1999. P. 291–298.
- Elahee M, Saleheen M.* Riverbank erosion and impact study. Department of Geography, Jahangir Nagar University, Dhaka, Bangladesh. 1992.
- Gain A.K., Giupponi C.* Impact of the Farakka Dam on Thresholds of the Hydrologic Flow Regime in the Lower Ganges River Basin (Bangladesh) // *Water.* 2014. 6. P. 2501-2518.
- Hore S.K., Sarker M.H., Ferdous Md.R., Ahsan M., Hasan Md.I.* Study of the off-take dynamics for restoring the Gorai river // *Proceedings of the 4th International Conference on Water & Flood Management, Dhaka, Bangladesh, 2013.*
- Hillary E.S.* From Ocean to the Sky. Viking Publisher: New York. 1979. 35 p.
- Islam Md. T.* River channel migration: a remote sensing and GIS analysis // *Proceedings of the 'ESA Living Planet Symposium', Bergen, Norway, 2010.*
- Mathematical Modelling of the Ganges In connection with the Proposed Ruppur Nuclear Power Plant// Institute Water Modelling; Bangladesh Atomic Energy Commission; Government of the People's. 2011.
- Mirza, M.M.Q.* Diversion of the Ganges Water at Farakka and its effects on salinity in Bangladesh // *Environ. Manag.* 1998. 22. P. 711–722.
- Mirza, M.M.Q.* Hydrological changes in the Ganges system in Bangladesh in the post-Farakka period // *Hydrolog. Sci. J.* 1997. 42. P. 613–631.
- Mirza, M.M.Q., Warrick, R.A., Ericksen, N.J., Kenny, G.J.* Are floods getting worse in the Ganges, Brahmaputra and Meghna basin? // *Environmental Hazards*, 2001. 3. P. 37–48.
- Rahman M.R.* Impact of riverbank erosion hazard in the Jamuna floodplain areas in Bangladesh // *J. Sci. Foundation*, 2010. 8 (1&2). P. 55-65.
- Satter A.* Farakka: Bangladesher Bhagya Zekhane Bondi. Padma-Jamuna Prakashani: Dhaka, Bangladesh. 1996. P. 55–57 (in Bengali).