

СЕДИМЕНТОЛОГИЯ

УДК 551.3(78.79)(540)

**ИНДИКАТОРЫ ГЕОДИНАМИКИ ТРЕТИЧНОГО—ЧЕТВЕРТИЧНОГО ПЕРИОДОВ
В ПАЛЕОПРИБРЕЖНОМ УЧАСТКЕ БЕНГАЛЬСКОГО БАСЕЙНА (Индия)**

Судип Дей, Сувенду Гхош, Чандрани Деббарма, Прасамита Саркар

*Department of Geography and Disaster Management Tripura University,
Suruamaninagar-799130 Tripura (West), India*

Представлены данные исследования индикаторов осадочных процессов, происходивших в прибрежном участке Бенгальского бассейна во время третичного—четвертичного периодов. Изучены индикаторы трех типов: характер осадочной слоистости, микроструктура осадочных отложений и следы древних ископаемых. Как показывают наблюдения, разные виды осадочных структур развивались на территории исследований под воздействием активных геоморфологических процессов во время четвертичного периода. Микроструктурный анализ осадочного вещества был проведен двумя методами: с помощью микрофотографии и цифрового анализа цвета (Digital Colour Analysis, DCA). Микроструктурный анализ показывает, что геоморфологический процесс, судя по влиянию на форму, мощность слоев и минеральный состав осадков, оставался очень активным в четвертичный период. Обогащение осадков тяжелыми металлами (железистыми) свидетельствует о том, что режим осадконакопления имел периодически изменяющийся характер, либо он еще сопровождался влиянием приливов, так как в стабильных условиях происходит отложение легких минералов. Цифровые данные исследования микроструктуры методом DCA, фиксирующие гораздо большее количество тяжелых минералов типа железосодержащих фаз, также указывают на отложение более тяжелых частиц под действием колебаний режима осадконакопления или мощных приливов. Следы древних ископаемых, обнаруженные в осадочных слоях, также надежно подтверждают точку зрения относительно интенсивной динамики осадконакопления на исследуемой территории в третичный—четвертичный периоды. Характер поздне третичных отложений говорит о том, что накопление осадков в этот период происходило на морском побережье (с доминированием приливов) с низкой энергией течений, что обычно наблюдается в условиях теплого и влажного климата. В промежутки времени, переходного от поздне третичного к ранне четвертичному периодам, макроприливное побережье сменилось мезоприливным (с доминированием волнений). В качестве следующего этапа можно выделить среднеплейстоценовый период, когда режим осадконакопления был стабильным, что обусловило непрерывное отложение более тонких минеральных частиц в условиях изменения низкой и средней энергии течений. Третий этап, относящийся к недавнему геологическому времени, отмечен сдвигом береговой линии и изменением обстановки осадконакопления. В период от раннего до среднего голоцена береговая линия начала смещаться, что изменило геоморфологические условия этой территории от прибрежной до эстуариевой, впоследствии — внутриматериковой речной долины.

Обстановка осадконакопления в третичный—четвертичный периоды, Бенгальский прибрежный палеобассейн, микроструктура, цифровой анализ цвета, следы ископаемых.

**SOME REGIONAL INDICATORS OF THE TERTIARY—QUATERNARY GEODYNAMICS
IN THE PALEOCOASTAL PART OF THE BENGAL BASIN (India)**

Sudip Dey, Suwendu Ghosh, Chandrani Debbarma, and Prasamita Sarkar

Sedimentary processes in the paleocoastal part of the Bengal basin that occurred in the Tertiary and Quaternary have been addressed. Three indicators were used: sedimentary bedding forms, microstructure of the sediment, and trace fossils. Various forms of sedimentary structures developed under the influence of dynamic geomorphic processes in the study area in the Quaternary. The microstructure analysis of the sedimentary materials was made by two methods: microphotography and *Digital Color Analysis* (DCA). The microstructure analysis shows that the geomorphic process remained very dynamic in the Quaternary, influencing the form, thickness, and mineral composition of the sediment strata. The enrichment of the sediments in heavy minerals evidences either oscillating or combined flow sedimentation, while under stable conditions light-mineral deposition took place. The digital data of microfabric study by the DCA method also show that larger particles deposited in the oscillating or high-flow environment and evidence a greater amount of heavy minerals like ferruginous materials. Trace fossils found in the sediments of this area also strongly support the concept that the environment

remained dynamic during the Tertiary and Quaternary. The Late Tertiary deposition shows that, during these periods, the sediments were transported from tide-dominated marine coast with low flow energy, which is typical of hot and humid conditions. From Late Tertiary to Early Quaternary, the macrotidal coast became mesotidal (wave-dominated). The second phase is the Middle Pleistocene, when the environment was stable, favoring the continuous deposition of finer particles under low- to medium-flow energy conditions. The third phase, the Recent, is marked by the shoreline shift and modification of the environment. In the Early—Middle Holocene, the shoreline started to shift, which modified the geomorphic conditions of this place from coastal to estuarine and, finally, inland fluvial.

Tertiary—Quaternary environment, paleocoastal part of the Bengal basin, microstructure, digital color analysis, trace fossil

ВВЕДЕНИЕ

В течение третичного и четвертичного периодов интенсивность и характер взаимодействия между Индийской, Тибетской и Бирманской плитами оказывали постоянное влияние на эволюцию и условия осадконакопления в Бенгальском заливе [Smith, Hallam, 1970; Curry, Moor, 1974; Sclater, Fisher 1974; Curry et al., 1982; Validiya, 1984; Hutchison, 1989; Lee, Lawver, 1995; Acharyya, 1998; Uddin, Lundberg, 2004]. Ранее автор [Sahasrabundhe, 1963] предположил, что во время раннетретичного периода Индийский субконтинент дрейфовал к северу с очень большой скоростью 18—20 см/год, однако позднее эта скорость снизилась до 10 см/год. Около 60—44 млн лет, после нескольких столкновений Индийского и Азиатского субконтинентов (мягкое столкновение во время палеоцена и жесткое — во время эоцена) произошло вращение Индийского субконтинента против часовой стрелки. Бенгальский бассейн отделился от океана и стал развиваться в режиме остаточного бассейна в начале миоцена [Dey, 2005], и с этого момента началась история его осадконакопления. Отложение осадков на дне остаточного бассейна сыграло важную роль в эволюции формы рельефа этой территории [Uddin, Lundberg, 1998; Alam et al., 2003]. Несколько климатических изменений, вероятно, сыграли дополнительную роль в том, что касается относительного падения уровня моря вдоль побережья Бенгальского бассейна. В позднечетвертичный период произошло несколько изменений уровня моря и смещение береговой линии к югу [Dey et al., 2001; Dey, 2002; Paul, 2002; Hazra et al., 2002], что могло сыграть важную роль в развитии современной геоморфологии южных частей Бенгальского бассейна. 9—8 тыс. лет назад (период, соответствующий климатическому оптимуму голоцена) средняя температура была примерно на 2 °C выше современной. Скорость выпадения осадка также была выше [Siddhartha, 2001], что могло приводить к наводнениям на низинах только что образованной Бенгальской суши. Произошел также подъем уровня моря, и это последовало за его падением после окончания климатического оптимума голоцена, когда началось смещение береговой линии к югу.

С целью выяснения динамической природы геологических условий осадконакопления в Бенгальском заливе, авторы статьи предприняли изучение некоторых индикаторов осадконакопления на этой территории в третичный—четвертичный периоды. Для этого был выбран восточный берег лагеритной области в районе Мединипур между реками Силабаги на севере и Кансабати на юге (рис. 1), который по данным [Niyogi, 1970; Paul, 2002] является палеоприбрежной областью. Она представляет собой часть или всю целиком западную геотектоническую провинцию Бенгальского бассейна. Основная цель настоящего исследования — проанализировать некоторые индикаторы осадочного процесса и выяснить геологические условия осадконакопления в далеком прошлом этого региона.

МЕТОДОЛОГИЯ

Основным объектом исследования являются осадочные отложения третичного—четвертичного периодов в маленькой части реликтовой прибрежной равнины Бенгальского бассейна. Перед началом полевых работ авторы ознакомились с имеющейся по теме литературой в виде недавних научных статей, опубликованных в различных журналах, и докладов, представленных на семинарах, в газетах, местных изданиях и т. д. Полевые исследования были направлены на идентификацию особенностей осадочных отложений, таких, например, как типы осадков, характер слоистости и наличие следов древних ископаемых. Образцы для лабораторных исследований были отобраны из 12 мест, в которых древние осадочные слои обнажены вследствие размыва водой, строительства дорог или оказались на склоне речной долины. Детально были изучены конфигурации и литологические характеристики групп следов древних ископаемых. Полевые данные были обобщены и проанализированы для дальнейшей интерпретации. Используемая в статье терминология заимствована в основном из работ [Selby, 1985; Mikhailov, 1987].

Другим важным аспектом работы является исследование микроструктуры осадочных пород. Для микроструктурного анализа авторами применен новый метод, основанный на цифровой технологии и

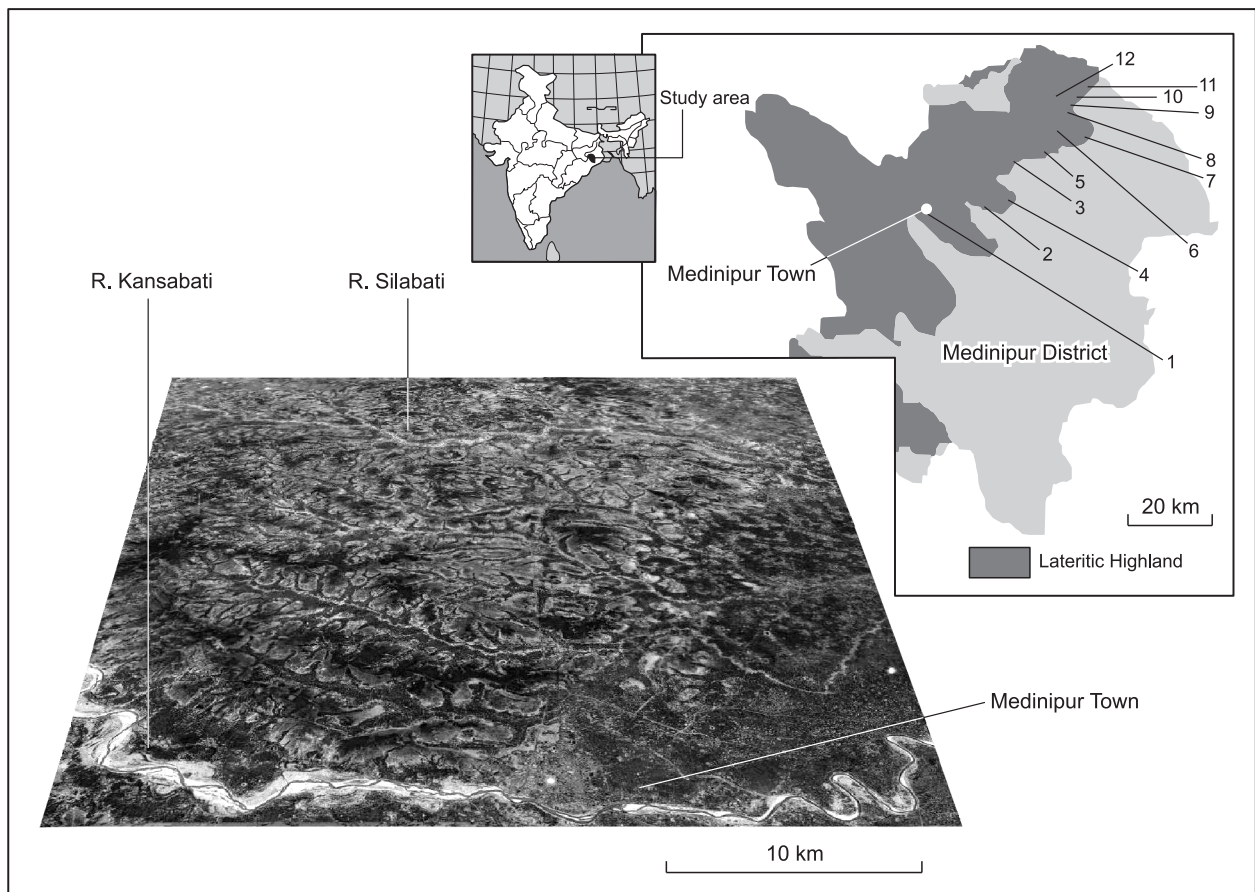


Рис. 1. Географическая позиция территории исследования (номераи обозначены точки отбора образцов).

создании образа. Процедура состоит из двух стадий: (1) микрофотографии и (2) цифрового анализа цвета (DCA) изображений. С целью создания изображений осадочных слоев в лабораторных условиях сделаны высокоразрешающие фотографии (в цифровом формате) образцов из разных типов осадочных пород. Все наборы фотографий или цифровые данные обработаны с помощью компьютера. Картины микротекстур выбранных образцов изучены с помощью метода DCA. Для этой цели с образцов осадочной породы из тонких слоев были получены полутонковые микроснимки со средним разрешением (8 бит информации при радиометрическом уровне, покрывающем 1×1 мм площади поверхности). Каждый пиксель изображений принимался как основная единица цвета. Разрешение (площадь на поверхности образца/пиксель) на всех снимках составляло 50 мкм. Для визуализации железистых и не содержащих железо минеральных фаз в отложениях были выбраны два цветовых ряда. Темные цвета отвечали железосодержащим минералам, имеющим низкую отражательную способность; светлые цвета отвечали минералам, не содержащим железо, например, силикатам, имеющим среднюю отражательную способность, и слюдам, характеризующимся очень высоким отражением, вплоть до блеска. Информация, полученная из анализа этих изображений (минеральный состав образца, взаимная ориентация минеральных зерен и углы между ними), использовалась для оценки специфики палеотечений.

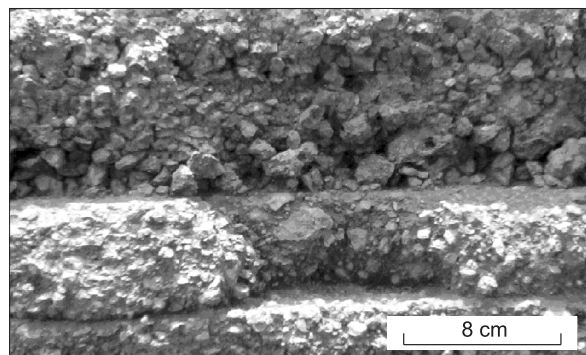
Для описания микротекстуры использованы термины: плотная (плотнупакованная, консолидированная; подтип: внедренная), рыхлая (дисперсная), упорядоченная (линейная и нелинейная). В выборе этой терминологии авторы оказались под влиянием работ своих предшественников [Brewer, 1976; van der Meer, 1987, 1993, 1996; van der Meer, Laban, 1990; Menzies, Maltman, 1992; Mantani et al., 2007]. В работе использованы те термины, которые авторы считали подходящими для метода DCA.

СТРУКТУРА И ХАРАКТЕР ОСАДКОВ

Картина слоистости. На исследуемой территории на разных глубинах установлено в общей сложности пять типов седловидных баровых осадочных структур, формирующихся под воздействием волн или приливов—отливов на входах в бухты или в устья рек. Это следующие типы: 1) с плоской слоистос-

Рис. 2. Плоская структура конгломерата.

тью (переслаивания конгломератов с алевритами), 2) с градационной слоистостью, 3) с косой слоистостью, 4) с троговой (мульдообразной) слоистостью и 5) с волновыми знаками. На исследуемой территории обнаружено два типа плоской слоистости. В южной части, вблизи р. Кансабати, обнаружена плоскостойкая структура, образованная твердыми конгломератами (толщина слоев от 0.2 до 8 см, рис. 2). В слоях этой структуры образуются выемки за счет выноса несцементированного гравия. Иногда такие впадинки в осадочных слоях заполнялись органическим веществом.



В северной части территории, вдоль р. Силабати, на глубине между 4—8 м от поверхности обнаружен другой вид осадочной структуры, образованной из слоев алеврита толщиной 5—9 см, разделенных сильно латеритизированными границами (рис. 3, *e*).

Во время полевых работ была также обнаружена троговая (мульдообразная) структура, образованная тонко- и среднезернистыми алевритами с толщиной слоев от 5 до 12 см (см. рис. 3, *d*). В пределах этой структуры найдена система однонаправленных косых слоев. Она состоит из тонких прослоек толщиной от 2 мм до 3 см. В этом участке найдены несколько толстых слоев, имеющих переменный от алеврита к суглинку состав и форму антидюн (см. рис. 3, *e*).

Ниже плоской и троговой (мульдообразной) слоистости отмечена структура песчаной ряби двух типов. Первая имеет асимметричную форму и образована волнами, вторая — симметрична и является результатом приливов и отливов. В последней приливно-отливной ряби найдено несколько признаков оползней, что говорит об изменении условий седиментации (см. рис. 3, *g, h*).

В этом месте наблюдались также градационная слоистость (см. рис. 3, *a*) и пламенная текстура ритмической слоистости (см. рис. 3, *b*). Ритмическая слоистость характеризуется большими углами падения (45—50°) и очень большой толщиной слоев (от 20 до 59 см). Слои же с пламенной текстурой имеют наклон от 5 до 10° и толщину от 4 до 6 см.

Общая характеристика осадков. Разрезы, вскрытые долинообразующей эрозией, показывают широкий диапазон изменения осадков на данной территории (рис. 4). Осадочный материал разного возраста представлен песчаниками, глинами, глинистыми сланцами, серыми слюдястыми сланцами, филлитами, кварцитами, эпидиоритами и т. д. Между древним и более молодым осадочным материалом имеется существенное различие в геометрической форме (рис. 5). Более древние по возрасту отложения (см. рис. 5, *Ia, IIa*) имеют обломки (зерна) с более выраженной конусовидной формой и более гладкой поверхностью, чем недавние (см. рис. 5, *Ib, IIb*). В косой слоистости найдены несколько карбонатных слоев (рис. 6).

Размер зерен в слоях с разными типами осадочной слоистости исследуемой области изменяется в широком диапазоне. Слои конгломератов и некоторых градационных слоев состоят из частиц большего размера (от 16 до 64 тыс. мкм). В слоях с градационной слоистостью размер зерен имеет смешанный характер с преобладанием более крупнозернистых текстур, особенно в южной части исследуемой области. В северной части наблюдалась градационная слоистость с пламенной текстурой, сформированной примерно на 60 % более мелкими частицами гравия (700 мкм) и крупного песка (100 мкм). Неритмические структуры в этой области образованы в основном алевритом (7.22—30 мкм) и суглинистым песком (250—500 мкм). Преобладание крупнозернистого алеврита и алевритовой глины установлено в слоях с волновой рябью и в слоях с симметричной рябью. Характерные особенности отложений с различными типами слоистости показаны в табл. 1.

МИКРОСТРУКТУРНЫЕ ИНДИКАТОРЫ ГИДРОДИНАМИКИ

Основное внимание при исследовании микроструктур образцов также было направлено на анализ состава тяжелых и легких минералов в осадочных породах (рис. 7). Сравнение градационных (рис. 7, *a, d, f*) и неградационных (см. рис. 7, *b, c, e*) отложений показывает, что тяжелые элементы в первых имеют максимальную концентрацию. Косая слоистость (см. рис. 7, *c*), возникшая вследствие комбинированного направления течения, также отмечена присутствием нескольких тяжелых минералов. В этом образце скопление тяжелых фракций наблюдается в его нижней части, тогда как легкие — концентрируются вверх. Очень заметны скопления слюды и кварца. Слои со знаками ряби (см. рис. 7, *b*) при незначительной примеси тяжелых содержат в основном легкие минералы. Минимальное содержание тяжелых минералов найдено в осадках, имеющих структуру антидюн и плоской слоистости (см. рис. 7, *e*). Эти данные

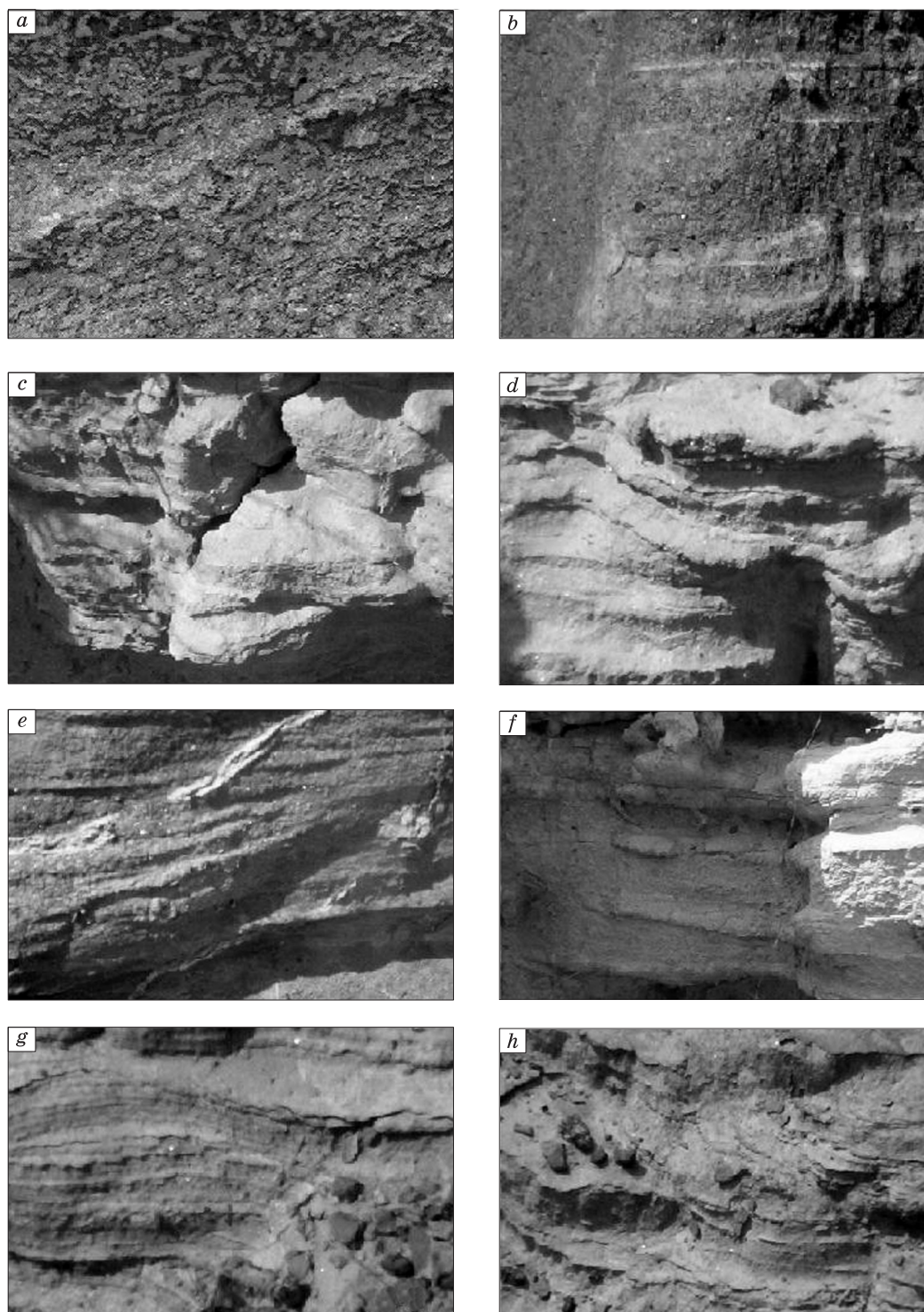


Рис. 3. Типы слоистости в осадках изучаемой территории.

a — градационная слоистость, *b* — градационная слоистость с пламенной текстурой, *c* — фрагмент структуры антидюны, *d* — троговая (мульдообразная) косая слоистость, *e* — косая слоистость, *f* — плоская слоистость (алеврит), *g* — волновая рябь, *h* — структуры приливно-отливной симметричной ряби со следами оползней.

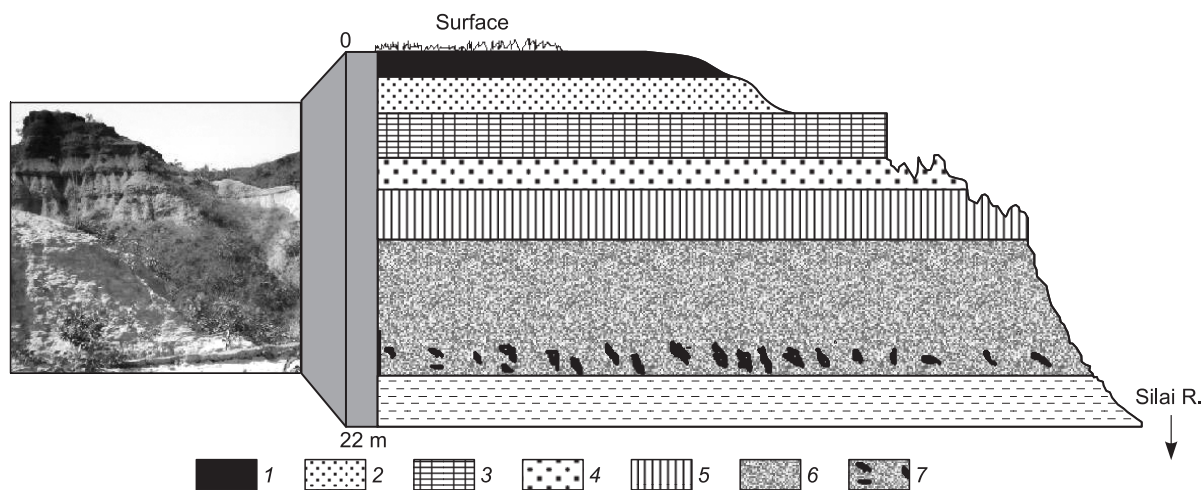


Рис. 4. Профиль обнажения склона долины р. Силабати, показывающий общую картину расслоения осадочной толщи на изучаемой территории.

1 — гумусовый горизонт, 2 — красная конкреционная почва, 3 — твердая корка, 4 — крапчатая глина (пятнистая), 5 — каолин, 6 — бледная зона, 7 — окаменелое дерево.

позволяют говорить, что во время седиментации проявили себя три главных типа водных потоков: 1) однопоточный (возможно, с изменчивой энергией), 2) разнонаправленный и 3) смешанного типа.

Микроструктурные модели распределения железистых и не содержащих железа отложений установлены на снимках DCA. Для микроструктурного анализа были выбраны отложения четырех типов: гравийные, песчаные крупнозернистые, суглинисто-песчаные алевритовые и алевритоглинистые (рис. 8). Анализ снимков на этом рисунке позволяет отметить следующие характерные особенности.

- В гравийных отложениях (см. рис. 8, A) установлены структуры трех типов: фото Aa и Ab показывают плотную матрицу, в которой высокожелезистое вещество внедряется в низкожелезистое. Силикатные отложения формируют рыхлую матрицу (см. рис. 8, Ac). Рисунок 8, Ac показывает, что матрица имеет плотный вид там, где минеральные фазы с высоким содержанием железа находятся за ее пределами, а низкожелезистые — внутри. Линейный тип распределения фиксируется в крупнозернистом слое (см. рис. 8, Ac).

- Обнаружено, что крупнозернистые осадки (см. рис. 8, B) образуют матрицу двух типов: плотную (консолидованную) и рыхлую. На рис. 8, Ba и Bb показаны примеры плотной матрицы, рис. 8, Bc показывает структуру внедрения. На рис. 8, Bd и Be — примеры рыхлой структуры матрицы. Обе серии снимков, A и B, показывают преобладание железистых минералов.

- На снимках, полученных от алевритовых отложений, преобладают силикатные осадки. Отложения с низким содержанием железа здесь установлены в рыхлых матрицах (см. рис. 8, Ca, b, d). В этих образцах обычны слоистые (блестящие частицы) отложения (см. рис. 8, Ca, b, d). На рис. 8, Cc, e видно, что плотная матрица образуется силикатными отложениями.

- Суглинисто-песчаные отложения имеют упорядоченную, плотную и рыхлую матрицу. На рис. 8, Da, c, e представлены упорядоченные матрицы (структурными элементами являются зародыши другой фазы); на рис. 8, Dd представлена рыхлая матрица, рис. 8, Db показывает плотную матрицу, име-

Таблица 1. Характер слоистости и состав осадков на территории отбора образцов

Слоистость осадка (сверху вниз)	Глубина от поверхности, м	Состав преобладающих осадков	Размер зерен, мкм
Плоская слоистость конгломерата	0	Гравий	16 000—64 000
Градационная слоистость	2—5	Крупнозернистый песок—мелкий гравий	100—7000
Градационная слоистость (пламенная текстура)	2—5		
Антидюны	3—5	Алевритовый и суглинистый песок	7.22—30, 250—500
Троговая (мульдообразная) косая слоистость	4—7	»	
Плоская слоистость (алеврит)	4—8	»	
Косая слоистость	7—9	»	
Волновые ряби (асимметричные)	9—10	Крупнозернистый алеврит	15.53—62.52
Симметричные ряби	—	Алевритовая глина	3.09—0.97

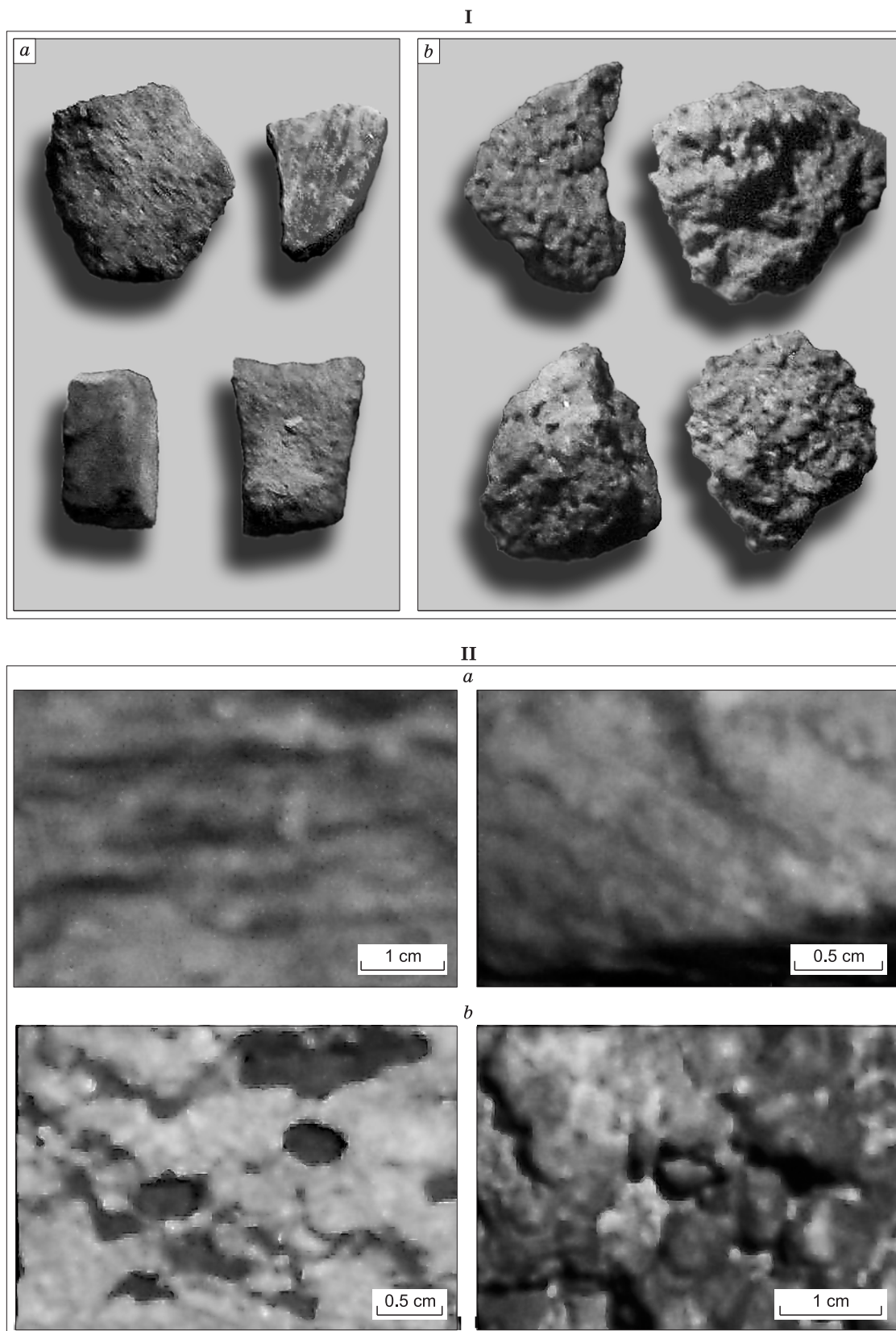


Рис. 5. Форма (I) и поверхность (II) образцов древних (a) и современных (b) отложений.

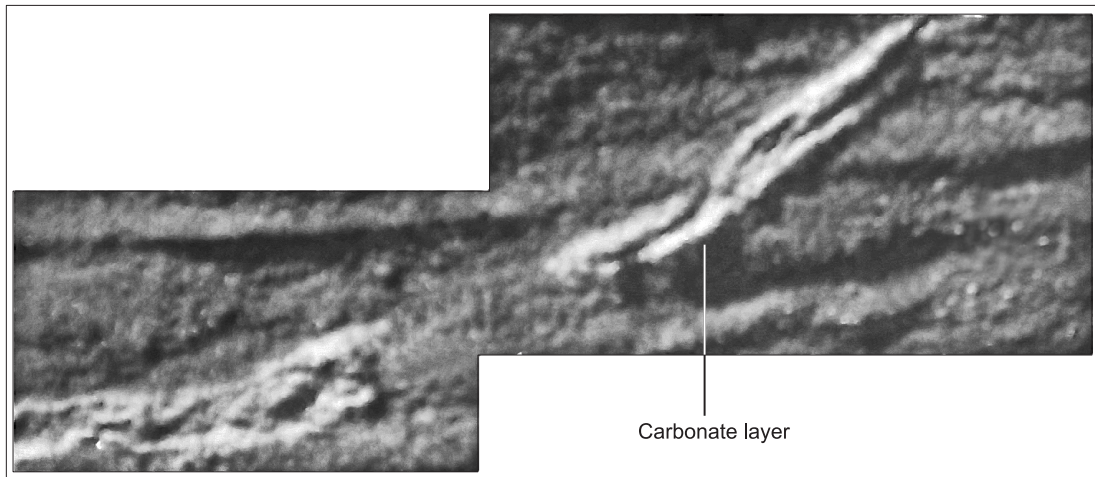


Рис. 6. Карбонатный слой на косой слоистости (мозаика).

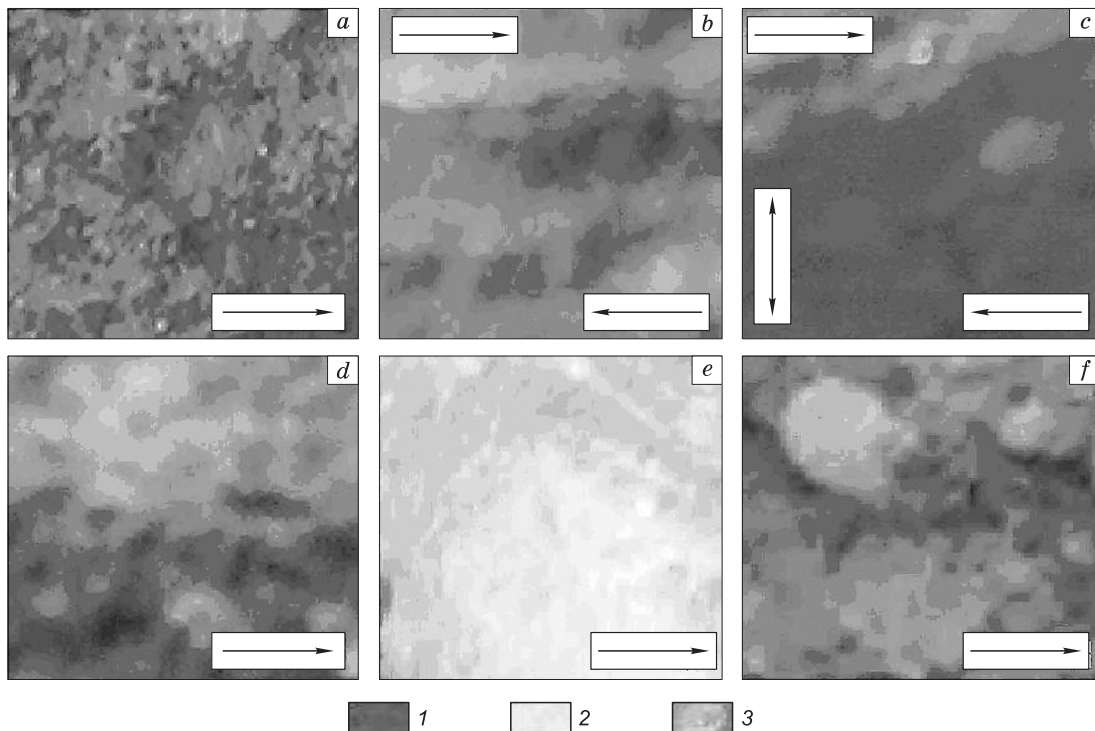


Рис. 7. Микрофотографии различных отложений с направлениями движения водного потока.

1 — железистые, 2 — кремнистые, 3 — слюдяные отложения; стрелка — направление потока; *a–f* — пояснения см. в тексте.

ющую высокое содержание железистых фаз. В этих отложениях очень распространены слюдястые минералы. Здесь также преобладает силикатный материал.

• Алевритово-глинистые отложения имеют в основном два типа микроструктур. На рис. 8, *Ea, b, d, e* показана рыхлая матрица, тогда как на рис. 8, *Eb* элементами структуры являются включения другой минеральной фазы.

СЛЕДЫ ИСКОПАЕМЫХ КАК ИНДИКАТОРЫ ПАЛЕОГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ

Осадочные слои исследуемой территории являются хранилищем следов ископаемых, свидетелей геологической истории осадконакопления в этих местах. Ранее [Bera, 1996] провел идентификацию 8 ро-

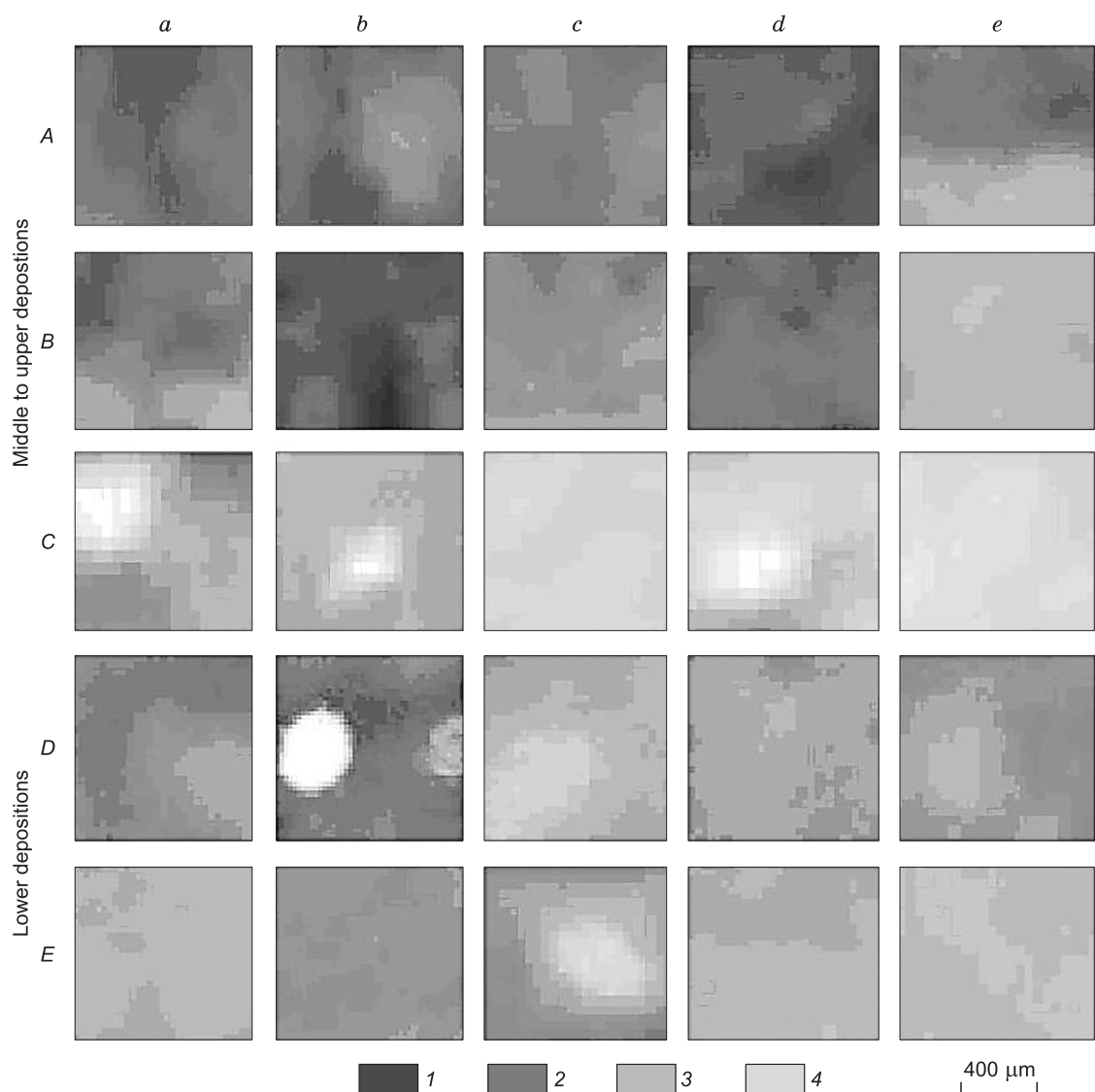


Рис. 8. Микроизображения (полутонные снимки с разрешением 8 бит) осадков, показывающие распределение минералов согласно их отражательной способности.

1 — высокожелезистые, 2 — низко- и среднежелезистые; нежелезистые: 3 — кремнистые, 4 — слюдяные.

дов и 11 видов ископаемых из третично-четвертичных осадков этого района. Авторами данной работы рассматриваются четыре типа следов ископаемых, найденных во время полевых работ в образованиях серповидного бара. Это — следы покоя, обитания, ползания и питания (табл. 2). Обнаруженные признаки корней сосудистых растений (ризоитов) также включены в табл. 2.

По данным ряда авторов [Seilacher, 1964; Crimes et al., 1977], условия морского мелководья на границе между песком и илом являются благоприятными для обитания *Bergaueria hemispherica*. По мнению авторов [Chiplonkar, Badve, 1969], *Oniscoidichnus communis*, *Oniscoidichnus elegans*, *Protovirgu* sp. и некоторые атропоиды обитали на побережьях от мелководных мезоприливных (песчаных) до макроприливных (илистых) и эстуариевых обстановок со стабильными условиями осадконакопления. Фрей с соавторами [Frey et al., 1978] считали, что прибрежная песчаная обстановка осадконакопления была благоприятна для обитания *Ophiomorpha nodosa*, тогда как [Ratecliffe, Fagerstrom, 1980] рассматривали условия затопляемой плоской низины с периодически изменяющейся обстановкой осадконакопления как подходящие для жизни *Cylindricum* sp., *Thalassinoides Ehrenberg*, *Thalassinoides* sp. Следы ископаемых, найденные на этой территории, наводят на мысль, что осадконакопление в этом районе происходило в обстановках, промежуточных между прибрежно-морскими и эстуариевыми. Следы форм жизни, характерные для обстановки осадконакопления с приливами средней и высокой амплитуды, говорят о том, что обстановка прибрежного осадконакопления в течение всего четвертичного периода периодически менялась, особенно резко в раннем голоцене, когда береговая линия сместилась к югу.

Таблица 2.

Ансамбли следов ископаемых и вероятные условия их консервации

Тип следов ископаемых и ризоиды	Название ископаемого	Литология сообществ ископаемых	Вероятные условия консервации следов ископаемых*
Следы покоя	<i>Bergauera hemispherica</i>	Алеврит и алевритовая глина	Морское мелководье с разделительной границей между песком и илом
Следы обитания	<i>Cylindricum</i> sp.	Латеритный конгломерат	Заливаемая водой очень низкая равнина с периодическими колебаниями условий осадконакопления
	<i>Thalassinoides Ehrenberg</i>	Алеврит и алевритовая глина	
	<i>Thalassinoides callia nassae</i>	»	
	<i>Thalassinoides</i> sp.	»	
Следы ползания	<i>Oniscoidichnus communis</i>	Латеритный конгломерат	Зона, переходная от прибрежно-мелководной к эстуариевой, характеризующаяся средними (песчаная фаза) и высокими (илистая фаза) приливами
	<i>Oniscoidichnus elegans</i>	»	
	<i>Protovirgularia</i> sp.	Алеврит и алевритовая глина	
	Петлеобразные следы (антропоиды)	Крупнозернистый алеврит, алеврит и алевритовая глина	
Следы питания	<i>Ophiomorpha nodosa</i>	»	Прибрежное мелководье с приливами средней силы
Ризоиды	Корни сосудистых растений	Крупнозернистый алеврит	Макроприливное побережье со стабильными условиями

* Согласно [Bera, 1996].

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ДАННЫХ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ВАРИАЦИЙ ОБСТАНОВОК ОСАДКОНАКОПЛЕНИЯ

Для оценки динамики осадочного процесса в третичный—четвертичный периоды использовались данные о типах отложений в изученной области и микроструктурах выбранных образцов (табл. 3). Хронологическая шкала (см. табл. 3), согласно методологии [Bera, 1996], установлена на основе групп следов ископаемых и их литологии. При оценке динамических и палеогеоморфологических условий во время третичного—четвертичного периодов учитывались также данные из нескольких более ранних работ. Так, [Nandi, 1985] предположил, что во время поздне третичного периода осадконакопление в Бенгальском бассейне могло происходить в низкоэнергетической прибрежно-морской (преимущественно приливной) обстановке, причем осадки отлагались в условиях более теплого климата, чем в недавнем прошлом. В опубликованном источнике [Wadia, 1919] утверждается, что конгломератовый тип Восточно-Индийского плато является сильным аргументом в пользу жаркого, влажного, богатого муссонами климата поздне третичного периода. Симметричные структуры ряби подтверждают то, что в то время здесь существовала очень плоская илистая макроприливная обстановка с доминированием прилива. Структуры асимметричной волновой ряби свидетельствуют о небольшом изменении условий осадконакопления, которые также привели к изменениям геоморфологии. В переходный от позднего плиоцена к раннему плейстоцену период макроприливное побережье трансформировалось в мезоприливное с преобладанием волновой деятельности. По данным [Paul, 2002], уровень мирового океана во время позднего плейстоцена был на 60—120 м ниже современного. В этот период, поскольку температура начала подниматься и, соответственно, очень равномерно возрастал сток воды, формировались плоская, троговая и косая слоистости. Последние два типа слоистости образовались в результате смешения направлений водных потоков, что говорит о начале медленного изменения в обстановках осадконакопления.

Предшествующие работы [Chatterjee, 1972; Uimitsu, 1987; Merh, 1987; Dey, 1999] показывают, что период голоцена был отмечен несколькими фазами морских трансгрессий, каждая из которых следовала за регрессиями. 6000 лет назад средняя температура была примерно на 2° выше современной, и, возможно, выше была скорость осаждения взвешенных частиц из морской воды [Siddhartha, 2001]. Этот период известен под названием климатический оптимум голоцена. После этого началось похолодание и субтропические районы стали суше. Средняя часть голоцена отмечена в Бенгальском бассейне быстрым смещением береговой линии к югу [Dey et al., 2003]; очертания современного берега установились в пределах 6 тыс. лет тому назад [Pethick, 1984].

Формы образцов, показанных на рис. 5, а (гладкая поверхность с отчетливой конусовидностью) свидетельствуют о том, что осадочный материал приносился в эти места издалека мощными потоками воды. Микроструктуры осадочных отложений подтверждают точку зрения о вариации потоков в течение третичного—четвертичного периодов, в результате чего сформировалась слоистость разных типов. Помимо этого, микроструктура осадочного материала сохраняет в себе элементы раннего геоморфического процесса, имевшего место в эти периоды. Микроструктура с преобладанием силикатной фазы в образцах

Таблица 3. Динамика геологических условий осадконакопления в третичный—четвертичный периоды

Отложения			Процесс		Предполагаемые условия осадконакопления
возраст	состав	микротекстура	Направления потоков	Режим осадконакопления	
Средний голоцен	Гравий	Плотная, рыхлая и упорядоченная (преобладание железистых минералов)	Однонаправленный поток (пласт: плоская слоистость конгломератов)	Эстуариевый; энергия потока — от высокой до низкой	Первоначально — сверхмощный поток, способный к перемещению грубого материала; ослабление мощности потока к концу голоценового оптимума. Начало смещения береговой линии к югу
Ранний средний голоцен			Поток с периодическими колебаниями интенсивности (пласт: ритмичная слоистость)	Эстуариевый; энергия потока — средняя—низкая	
Ранний голоцен	Мелкий гравий — крупнозернистый песок	Плотная и рыхлая (преобладание железистых минералов)	Периодические колебания мощности потока/ смешанные направления (пласт: градиционная слоистость с пламенной текстурой)	Эстуариевый; энергия потока — средняя—высокая	Ундулирующая топография с крупнозернистыми осадками. Угол наклона от высокого до среднего
Поздний плейстоцен	Алеврит	Плотная и рыхлая (преобладание силикатов; низкое содержание железистых минералов)	Однонаправленный поток (пласт: антидюны) Поток со смешанными направлениями (пласт: троговая косая слоистость) Однонаправленный поток (пласт: плоская слоистость)	Эстуариевый; энергия потока — высокая Мелководно-морской — прибрежный (преобладание волн); энергия потока — средняя Прибрежно-морской (преобладание волн); энергия потока — средняя	Стабильные условия при наличии склона со средним углом падения Мезоприливная низменность
	Суглинистый песок	Плотная, рыхлая, упорядоченная (преобладание силикатов, характерны слюдястые минералы)	Поток со смешанными направлениями. (пласт: косая слоистость)	Мелководно-морской — прибрежный (преобладание волн); энергия потока — средняя	
Поздний плиоцен—ранний плейстоцен	Крупнозернистый алеврит	Рыхлая, упорядоченная (преобладание силикатов; характерны слюдястые минералы)	Разнонаправленный поток (пласт: волновая рябь)	Мелководно-морской — прибрежный (преобладание волн); энергия потока — средняя	Морфология заиленной низменности. Признаки оползней свидетельствуют о возможных тектонических изменениях к началу плейстоцена. После этого произошло постепенное изменение геоморфологии (от высоко- до среднеприливной)
Поздний плиоцен—миоплиоцен	Алевритовая глина		Периодически изменяющийся поток (пласт: симметричная рябь)	Прибрежно-морские (преобладание приливов); энергия потока — низкая	

из нижележащих осадков говорит о том, что медленное изменение геоморфологии происходило в переходный от поздне третичного к ранне четвертичному периоду. В морфологии наблюдается переход от макроприливной к мезоприливной равнине. При этом изменилась и природа процесса: приливы сменились волнением. Во время среднего плейстоцена, вероятно, установились стабильные условия осадконакопления, когда имело место совместное отложение очень мелких силикатных и слюдястых частиц. Ближе к раннему голоцену процесс резко изменился, и вследствие начавшихся колебаний условий осадконакопления вместе с легкими откладывались многие тяжелые (железистые) минералы. Максимальное увеличение энергии потока приходится на голоценовый оптимум, когда произошло максимально интенсивное отложение железистых фаз.

ВЫВОДЫ

Осадочные породы даже на маленькой площади сохраняют информацию о последовательных изменениях геологических условий осадконакопления в виде таких признаков, как картины слоистости, микроструктуры, ансамбли следов древних ископаемых. Результаты настоящего исследования показывают,

что различные индикаторы, обнаруженные в локальном участке осадочных пород, свидетельствуют о наличии трех этапов в геологической истории данного региона. На первом, продолжавшемся от позднего плиоцена до раннего плейстоцена, район представлял собой макроприливное (или с доминированием приливов) илистое побережье. Во время раннего плейстоцена мощность приливов—отливов снизилась, и этот процесс приобрел волновой характер. Вторая фаза приходится на период среднего плейстоцена, когда обстановка осадконакопления была относительно стабильной. При этих условиях (низкая до средней энергия водного потока) происходило непрерывное отложение самых мелких частиц. Третий этап, или недавнее геологическое прошлое, отмечен сдвигом береговой линии и изменением обстановки осадконакопления. В середине голоцена береговая линия начала смещаться, что существенно изменило геоморфическое положение данного места: из прибрежного оно превратилось в эстуариевое и в конечном итоге стало внутриматериковой речной долиной. В настоящее время данный район представляет собой реликтовый участок побережья или сформировавшуюся прибрежную равнину, находящуюся в 90—100 км от современной береговой линии. Исследования с помощью метода цифровой обработки изображений показывают, что микроструктура осадков, как и общая картина слоистости, также являются продуктивным способом оценки флуктуаций водного потока (направлением и энергией) в процессе осадконакопления. Кроме этого, следы ископаемых, обнаруженные в разных осадочных слоях, также свидетельствуют о том, что во время третичного и четвертичного периодов обстановки седиментации в данном районе изменились от макроприливно-го к мезоприливному побережью.

Авторы выражают благодарность проф. Г.П. Чаттопадхья (Отделение географии, Университет Висба-Бхарати) за технические советы во время исследований. М-ру Сабхьясачи Маити (Отделение геологии и геофизики) за предоставление информации, оказавшейся очень полезной для планирования исследований. Мы очень благодарны рецензентам Т.Н. Херасковой (Геологический институт РАН, Москва) и Е.М. Хабарову (Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, Новосибирск), которые своими техническими советами помогли улучшить рукопись.

ЛИТЕРАТУРА

Acharyya S.K. Break-up of the greater Indo-Australian continent and accretion of blocks framing South and East Asia // *J. Geodyn.*, 1998, v. 26, p. 149—170.

Alam M., Alam M.M., Cbrray J.R., Chowdhury M.L.R., Gani M.R. An overview of the sedimentary geology of the Bengal Basin in relation to the regional tectonic framework and basin-fill history // *Sedimentary Geology Elsevier*, 2003, v. 155, p. 179—208.

Bera S. Remarks on paleoenvironment from the trace fossil from subsurface and outcrop Tertiary-Quaternary sediments of the western part of Bengal Basin, India // *J. Geogr. Envir.*, 1996, v. 1, p. 1—15.

Brewer R. Fabric and mineral analysis of soils. Huntingdon, New York, Krieger, 1976.

Chatterjee S.N. Some aspects of batch erosion and littoral drift at Digha, West Bengal // *J. River Res. Institute*, 1972, p. 1—15.

Chiplonkar G.W., Badve R.M. Trace fossils from the Bagh beds // *J. Palaentol. Soc. India*, 1969, v. 14, p. 1—20.

Crimes T.P. et al. Late Precambrian-low Lower Cambrian trace fossil from Spain / Eds. T.P. Crimes, J.C. Harper. Trace Fossil 2 // *Geol. J. Special-9*, 1977, p. 139—162.

Curray J.R., Moore D.G. Sedimentary and tectonic processes in Bengal deep-sea fan and geosyncline / Eds. C.A. Burk, C.L. Drake // *Trace Geology of Continental Margins*. Springer-Verlag, New York, 1974, p. 617—628.

Curray J.R., Emmel F.J., Moore D.G., Raitt R.W. Structure, tectonics and geological history of the northeastern Indian Ocean / Eds. A.E.M. Nairn, F.G. Stehli // *The ocean basins and margins. The Indian Ocean*, 1982, v. 6, Plenum, New York, p. 399—450.

Dey S. Natural environmental control through seasons on morphology of Digha-Shankarpur coastal tract of Medinipur, West Bengal // *Indian J. Geogr. Envir.*, 1999, v. 4, p. 16—23.

Dey S. Impact of sea level change upon landform development along Digha coastal tract and risk assessment by process efficiency // *Indian J. Geomorph.*; *Academic and Law Serials*, N. Delhi, 2002, v. 7, p. 111—117.

Dey S. Conceptual models for the assessment of Tertiary-Quaternary geomorphic evolution of paleo-coastal Tripura // *Annals of the National Association of Geographers, India*, 2005, v. XXV, № 1 (June), p. 73—80.

Dey S. et al. Holocene sea level change of West Bengal coast // *Indian Geograph. J. Chennai, India*, 2001, v. 77, № 1, p. 7—20.

Dey S. et al. The influence of natural environment upon the evolution of sand dunes in tropical environment along Medinipur coastal area // *Indonesian J. Geography, Yogyakarta, Indonesia*, 2005, v. 37, № 1, p. 51—68.

- Falvey D.A.** The development of continental margins in plate tectonic theory // *J. Aust. Pet. Explor. Assoc.*, 1974, v. 14, p. 95—106.
- Frey R.W. et al.** *Ophiomorpha*: its morphologic, taxonomic and environmental significance // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1978, v. 23, p. 199—229.
- Hazra S., Ghosh T., Baksi A., Ray N.** Sea level change: its impact on West Bengal coast // *Indian J. Geogr. Envir.*, 2001, v. 6, p. 25—37.
- Hutchison C.S.** Geological evolution of South-East Asia. Clarendon Press, London, 1989, 368 p.
- Lee T.T., Lawver L.A.** Cenozoic plate reconstruction of Southeast Asia // *Tectonophysics*, 1995, v. 251, p. 85—138.
- Mamtani M. et al.** Microstructure in banded iron formation (Gua Mine, India) // *Geol. Magaz.* Cambridge University Press, 2007, v. 144 (2), p. 271—287.
- Menzies J., Maltman A.J.** Microstructures in diamictites—evidence of subglacial bed conditions // *Geomorphology*, 1992, v. 6, p. 27—40.
- Merh S.S.** Quaternary sea level changes: the present status vis-a-vis records along coasts of India // *Indian J. Earth Sci.*, 1987, v. 14, p. 235—251.
- Mikhailov A.Ye.** Structural geology and geological mapping. Moscow, Mir, 1987.
- Nandi M.** Geographical account of Tripura // *An anthology of Tripura* / Ed. J. Gan-Chowdhui. New Delhi, Inter-Indian Publication, 1985, p. 1—9.
- Niyogi D.** Geological background of beach erosion of Digha // *West Bengal, Bulletin, Geology Mining and Metallurgical Society of India*, 1970, v. 43, p. 1—36.
- Paul A.K.** Coastal geomorphology and environment. Kolkata, ACB Publications, India, 2002.
- Petchick J.** An introduction to coastal geomorphology. London, Edward Arnold.
- Ratecliffe B.C., Fagerstrom J.A.** Envertebrate lebensspuren of Holocene flood plain—their morphology, origin and palaeoecological significance // *J. Palaeontol.*, 1980, v. 54, p. 614—630.
- Sahasrabudhe P.W.** Paleomagnetism and geology of Deccan traps // *Proceedings of Seminar on geophysical investigation on Peninsular India*. N.G.R.I, Hyderabad, 1963, p. 226—243.
- Slater J.G., Fisher R.L.** Evolution of the east-central Indian Ocean, with emphasis on the tectonic setting of the Ninetyeast Ridge // *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 1974, v. 85, p. 683—702.
- Seilacher A.** Biogenic sedimentary structure // *Approaches to Palaeoecology* / Eds. J. Imbre, N.D. Newell. John Wiley and Sons, 1964, p. 296—361.
- Selby M.J.** Earth's changing surface—an introduction to geomorphology. Oxford, Clarendon Press, 1985.
- Siddhartha K.** Atmosphere, weather and climate. New Delhi, Kishalaya Publishers Pvt. Ltd., India, 2001, p. 369—385.
- Smith A.G., Hallam A.** The fit of southern continents // *Nature*, 1970, v. 225, p. 139—144.
- Uddin A., Lundberg N.** Cenozoic history of the Himalayan—Bengal system: sand composition in the Bengal basin, Bangladesh // *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 1998, v. 110, p. 97—511.
- Uddin A., Lundberg N.** Miocene sedimentation and subsidence during continent—continent collision, Bengal basin, Bangladesh // *Sedim. Geol.* Elsevier, 2004, v. 164, p. 131—146.
- Umitsu M.** Late Quaternary sedimentary environment and landform evolution in the Bengal lowland // *Geographical Review of Japan*, 1987, p. 164—178.
- Valdiya K.S.** Aspects of tectonics focus on South-Central Asia. Tata-McGraw-Hill Publication Company Limited, 1984.
- van der Meer J.J.M.** Micromorphology of glacial sediments as a tool in distinguishing genetic varieties of till // *Geological Survey of Finland, Special Paper 3*, 1987, p. 77—89.
- van der Meer J.J.M.** Microscopic evidence of subglacial deformation // *Quat. Sci. Rev.*, 1993, v. 12, p. 553—587.
- van der Meer J.J.M.** *Micromorphology* / Ed. J. Menzies // *Glacial environments*, V. 2. Oxford, Butterworth-Heinemann, 1996, p. 335—355.
- van der Meer J.J.M., Laban C.** Micromorphology of some North Sea fill samples, a pilot study // *J. Quat. Sci.*, 1990, v. 5, p. 95—101.
- Varga R.J.** Burma / Eds. E.M. Moores, R.W. Fairbridge // *Encyclopedia of European and Asia regional geology*. London, Chapman & Hall, 1997, p. 109—121.
- Wadia D.N.** Geology of India. New Delhi, Tata-McDraw-Hill, 1919.