= МОРСКАЯ ГЕОЛОГИЯ =

УДК 551.242.2

СТРОЕНИЕ ЗЕМНОЙ КОРЫ И ТЕКТОНИЧЕСКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ЦЕНТРАЛЬНО-БЕНГАЛЬСКОЙ КОТЛОВИНЫ

© 2025 г. В. К. Илларионов^{1, *}, О. Ю. Ганжа², Д. А. Ильинский²,

К. А. Рогинский², Л. Д. Флейфель¹, А. Ю. Борисова³

¹ Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия
 ² Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия
 ³ Институт геологических и экологических наук, Тулуза, Франция

 * e-mail: vkillar@mail.ru
 Поступила в редакцию 03.06.2024 г.
 После доработки 05.09.2024 г.
 Принята к публикации 22.11.2024 г.

Проведен комплексный анализ геолого-геофизических данных, характеризующих строение Центрально-Бенгальской котловины (ЦБК) и обрамляющих ее структур. Впервые представлен субмеридиональный разрез глубинного сейсмического зондирования, пересекающий ЦБК. Установлено, что консолидированная кора в ЦБК имеет сложное блоковое строение. Скоростные характеристики фундамента и градиентное двухслойное строение верхней мантии однозначно указывают на то, что котловина была заложена на континентальной, а не на океанической коре. Механизмом опускания фундамента ЦБК, амплитуда которого достигает 11 км, может служить уплотнение основных пород нижней части континентальной коры при ее контакте с разогретой верхней мантией и переходе габброидов в эклогиты, плотность которых (3.6 г/см³) выше, чем у мантийных перидотитов (3.3 г/см³). Сделан вывод, что ЦБК, Хребет 85° в.д. и Бенгальский сектор Восточно-Индийского хребта представляют собой реликтовые фрагменты дифференцированно погрузившейся восточной части Индийского палеоматерика.

Ключевые слова: континентальная кора, дифференцированные тектонические движения, граница Мохо, скоростной разрез, изотопный состав Nd, базальты, Индийский океан **DOI:** 10.31857/S0030157425020133, **EDN:** DZDSCC

1. ВВЕДЕНИЕ

Центрально-Бенгальская котловина, как следует из ее названия, расположена в центральной части Бенгальского залива. Долгое время о ее существовании можно было судить по контурам изопахит максимальных значений осадочной толщи на схематизированной карте мощности осадков Бенгальского залива, построенной Дж. Каррей с соавторами [17] (рис. 1, врезка). В 2016 г. нами была построена карта глубин акустического фундамента Бенгальского залива (БЗ), которая дала наиболее полное представление об особенностях его строения [4]. В качестве исходного материала для построений мы использовали массив цифровых данных мощности осадочного чехла в Индийском океане (National Geophysical Data Center, NGDC). При программировании компьютерного алгоритма поверхность дна БЗ условно принималась за ровную поверхность, поэтому параметры глубины фундамента определялись как функция

NGDC достаточного объема данных по западной части Б3 рельеф фундамента этого региона получил самые общие морфоструктурные очертания

сенной в банк данных NGDC.

мощности осадочного чехла в каждой точке, вне-

Однако оказалось, что из-за отсутствия в базе

чил самые общие морфоструктурные очертания. Дополнительную информацию дал анализ опубликованных разрезов сейсмоакустического профилирования, а также карт мощности осадочного чехла, глубины кристаллического фундамента и поверхности границы Мохо [33]. На построенной таким образом карте видно, что основным тектоническим фактором, определяющим структурный план фундамента БЗ, являются три развивающихся депоцентра, с которыми связано образование соответствующих котловин (рис. 1). В Западной и Центрально-Бенгальской котловинах фундамент относительно поверхности воды опущен на глубину 11-12 км. В депоцентре котловины Джессор (Jessore depression) отмечается максимальная глубина залегания фундамента более 20 км [16]. На горстовых блоках Хребта 85° в.д., разделяющего Западную котловину от двух других, кровля фундамента расположена на глубине 4—6 км, что свидетельствует о значительной вертикальной расчлененности фундамента БЗ.



Рис. 1. Карта глубин акустического фундамента БЗ, изогипсы, км ([4] с доп.). На карте выделены основные структурно-тектонические таксоны фундамента БЗ и нанесена схема геолого-геофизической изученности его центральной части. І – структурно-тектонические таксоны первого порядка: 1 – Центрально-Бенгальская котловина, 2 – Хребет 85° в.д., 3 – Восточно-Индийский хребет, 4 – депрессия Джессор, 5 – Западная котловина, 6 – Восточно-Индийское плато, 7 - "структурный вал", 8 - Южно-Шриланкийская котловина; II - сейсмоакустические радиобуи, в числителе дана скорость сейсмических волн в фундаменте, в знаменателе глубина залегания его кровли [29]; III – профили ОГТ: MAN1, MAN3 (MV Sagar Sandhani, [30]), SK 107-07 (ORV Sagar Kanya, [27]), MCS-I (ИС Хайяндичжи-9, R.V. Haiyangdizhi-9, 2019 [35]), профили ГСЗ МЗ, М4 (НИС "Мезень", 2003); IV – профили ГСЗ 2, 5, 11 [36]: V – скважины глубоководного бурения проекта DSDP; VI - скважина проекта IODP-1444; VII скважины промышленного бурения; VIII - эпицентры современных землетрясений [23].

Центрально-Бенгальская котловина расположена между бенгальским сектором Восточно-Индийского хребта и Хребтом 85° в.д. По морфологическим признакам она имеет полого-вогнутую форму с депоцентром, расположенным в центральной части. Она выполнена мощной толщей осадочных пород и, по существу, представляет собой классический седиментационный бассейн, который в дальнейшем мы будем называть Центрально-Бенгальский бассейн (ЦББ).

В отношении природы земной коры в Бенгальском заливе высказывались различные точки зрения. В 70-е гг. прошлого столетия после того, как были получены первые сведения о том, что в строении кристаллического фундамента БЗ участвуют породы со скоростями прохождения сейсмических волн 6.1-6.2 км/с, был сделан вывод о преимущественно континентальном типе коры [15, 29]. Однако с ростом популярности идей концепции плитовой тектоники получила развитие иная точка зрения. Дж. Пирс [31] одним из первых высказал идею о том, что в БЗ развита океаническая спрединговая кора раннемелового возраста, после чего этот постулат был подхвачен и стал кочевать из одной статьи в другую. А выделенный сейсмикой низкоскоростной комплекс консолидированной коры получил иную интерпретацию, согласно которой он стал считаться "третьим слоем океанической коры" [33].

Таким образом, согласно методологии, разработанной плитовой тектоникой, принято считать, что в БЗ развита океаническая (спрединговая) кора, возраст которой определяется по магнитометрическим данным и датируется разными исследователями в диапазоне от поздней юры до раннего мела. Однако вполне очевидно, что для подобных утверждений, базирующихся главным образом на теоретических идеологемах и опосредованных данных, нужны более веские геолого-геофизические доказательства.

В данной статье впервые представлены результаты исследования строения кристаллической коры и верхней мантии Центрально-Бенгальской котловины, полученные методом глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ) в 2003 г. с борта НИС "Мезень". Привлекались также данные, полученные методом отраженных волн, и материалы глубоководного бурения, находящиеся в свободном доступе. Комплексный геолого-геофизический анализ этих данных позволил расширить представление о строении консолидированной коры и верхней мантии и ответить на некоторые вопросы относительно геологического развития данного региона.

2. ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ ОСАДОЧНОГО ЧЕХЛА ЦЕНТРАЛЬНО-БЕНГАЛЬСКОГО БАССЕЙНА

Выдающейся особенностью строения дна Бенгальского залива (БЗ) является крупнейший в мире Бенгальский конус выноса. Ежегодно реками Ганг и Брахмапутра в БЗ выносится более 1.0×10^9 т наносов [10]. Выносу такой гигантской массы осадочного материала в значительной мере способствуют эрозионно-денудационные процессы, которые активно развиваются на быстро растущих, особенно в плиоцене, Гималайских горах.

Однако, высокие темпы осадконакопления даже в условиях "лавинной седиментации" (термин введен академиком А.П. Лисицыным) будут иметь место только при прогибании фундамента. Высокие скорости погружения, отвечающие геосинклинальному режиму, зафиксированы в отложениях плиоцена, мощность которых в скважине Порт-Каннинг-I составляет 3050 м (рис. 1).

Учитывая вышесказанное, следует подчеркнуть, что если фундамент в тектоническом отношении характеризуется стабильным положением, то осадочный материал в виде турбидитов будет транзитом выноситься за пределы БЗ и накапливаться в областях с более глубоким залеганием фундамента.

Ниже рассмотрим строение осадочного чехла на примере региональных широтных сейсмоакустических MOB-OГТ профилей MAN-1, SK107—07 и MAN-3 (рис. 2). На разрезах видно, что осадочный чехол характеризуется параллельно-слоистым залеганием слагающих его комплексов. Отсутствие признаков смятия в складки и крупных дизъюнктивных нарушений свидетельствует о его развитии преимущественно в спокойном тектоническом режиме.



Рис. 2. Региональные широтные разрезы МОВ-ОГТ (*a*-*в*), характеризующие строение дна Бенгальского залива. На вертикальной шкале дано время двойного пробега отраженной волны. Положение профилей см. рис. 1. Условные обозначения: ЗБ – Западный бассейн; Хр.85° – Хребет 85° в.д.; ЦББ – Центрально-Бенгальский бассейн; ВИХ – Восточно-Индийский хребет; зубчатая линия – океанический фундамент, по [32].

ОКЕАНОЛОГИЯ том 65 № 2 2025

В Центрально-Бенгальском бассейне (ЦББ), о котором, собственно, идет речь, наблюдается увеличение как общей мощности, так и мощности отдельных седиментационных комплексов от бортов бассейна к депоцентру. Такая закономерность свидетельствует о том. что осадконакопление шло конседиментационно. По данным работы [32], максимальная мошность осалков в ЦББ составляет 8.5 км, в то время как на ВИХ она уменьшается до 1.5 км, а на Хребте 85° в.д. – до 2.0-2.5 км. Следовательно, в ЦББ амплитуда компенсированного осадконакоплением прогибания относительно вершинных поверхностей хребтов составляет 6.5-7.5 км, а размах абсолютных нисходящих движений достигает 11.5 км, из которых 8.5 км были компенсированы осалками. Для гребневой части Хребта 85° в.д., расположенной на 500-800 м ниже вершинной поверхности ВИХ, амплитуда нисходящих движений составляет 4.0-4.5 км, из которых примерно 2.0-2.5 км были компенсированы осадками.

В строении осадочной толщи ЦББ было вылелено восемь селиментационных комплексов. датируемых раннемеловым-четвертичным временным интервалом [25]. Согласно автору, осадочный чехол подстилается океанической спрединговой корой раннемелового возраста. Как отмечалось выше, осадочная толща на сейсмических разрезах представлена слоистой последовательностью, выдержанной по простиранию. Неизвестно, сохраняют ли отложения свой фациальный обмен во внутренних частях ЦББ, однако латеральное единство разрезов свидетельствует о сходстве или близости палеогеографических условий осадконакопления. Следовательно, согласно геохронологическому расчленению осадочного разреза, в начале мелового периода ЦББ представлял собой область эпиконтинентального осадконакопления.

Отмечая крупноамплитудный размах прогибания фундамента в БЗ, мы тем самым затрагиваем вопрос о механизме этого тектонического процесса, который получил широкое обсуждение на страницах научных публикаций. С позиции плитовой тектоники, которая априори признает существование в БЗ океанической спрединговой коры, основная причина ее прогибания объясняется осадочно-вулканогенной нагрузкой. Для обоснования другой причины океаническая кора в предлагаемых моделях наделяется различными геофизическими свойствами. Она может быть молодой или древней (или в сочетании молодой и древней), тонкой или аномально толстой (за счет андерплейтинга), холодной или горячей, пластичной или упругой и т.д. В одной из последних работ по теоретическим расчетам в котловине Джессор допускается амплитуда погружения океанического фундамента под нагрузкой, соответствующая 20 км толще осадочного слоя [18].

Однако, поскольку плотность мантийного вещества несравнимо больше плотности осадочных и эффузивных пород, величина вдавливания коры в мантию будет ничтожной и всегда меньше мощности осадочно-вулканогенной нагрузки. Поэтому "механизм вдавливания под нагрузкой" представляется нам весьма проблематичным.

Для ответа на поставленный вопрос обратимся к строению хорошо изученных Прикаспийской и Баренцевоморской котловин, заложенных на континентальной коре [1-3]. Их изучение показало, что амплитуда погружения фундамента не зависит от мощности осадочной нагрузки, а утонение консолидированной коры происходит без существенных растягивающих напряжений. В Прикаспийской впадине осадочная толща мощностью 20-22 км залегает на консолидированной коре, мощность которой сокращена до 14-16 км. В Баренцевоморском прогибе мощность осадков достигает 18-20 км, а консолидированная кора утонена до 12-16 км. По расчетам, погружение фундамента в прогибе сопровождалось умеренным растяжением, которое не превысило 3-5% и могло обеспечить 5-10% ее погружения. По мнению Артюшкова, механизмом опускания может служить уплотнение основных пород нижней части континентальной коры при ее контакте с разогретой верхней мантией и переходе габброидов в эклогиты, плотность которых (3.6 г/см³) выше, чем у мантийных перидотитов (3.3 г/см³). Примером региона, где такой механизм работает, может служить глубоководная впадина Мексиканского залива, в строении литосферы которой установлено существование крупных масс тяжелого эклогита [28].

Таким образом, из приведенных примеров следует, что предложенный механизм, объясняющий крупноамплитудные компенсированные погружения фундамента, может "работать" только применительно к коре континентального типа. Мы полагаем, что аналогичный механизм погружения, принцип которого заключается в уплотнении пород нижней части континентальной коры, может быть также применен к Центрально-Бенгальскому бассейну, который, как будет показано ниже, был заложен на континентальной, а не на океанической коре.

3. ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ СТРУКТУР, ОБРАМЛЯЮЩИХ ЦЕНТРАЛЬНО-БЕНГАЛЬСКИЙ БАССЕЙН

С запада, востока и юга ЦББ обрамляют соответственно Хребет 85° в.д. и бенгальский сектор Восточно-Индийского хребта (ВИХ). К северу от ЦББ расположена котловина Джессор, которая представляет собой обособленно развивающийся депоцентр. На карте акустического фундамента Бенгальского залива видно, что Хребет 85° в.д. представляет собой отрог ВИХ (рис. 1). Структурное единство хребтов прослеживается также на карте гравиметрического поля (рис. 3). Оба хребта обрамляют ЦББ таким образом, что западный склон ВИХ является восточным склоном бассейна, а восточный склон Хребта 85° в.д. – западным. Таким образом, склоны хребтов и борта ЦББ образуют парагенетические морфоструктурные элементы, которые в процессе развития депоцентра и углубления бассейна развивались в едином тектоническом режиме.



Рис. 3. Гравиметрическая карта БЗ в редукции Буге [по 33 (с доп.)]. Цифры в кружках: *1* – Центрально-Бенгальский бассейн, *2* – Восточно-Индийский хребет, *3* – хребет 85° в.д. Пунктирными линиями обозначены профили ОГТ; сплошными линиями даны профили ГСЗ: М-1, М-2, М-3, М-4, М-5 (НИС "Мезень"); профили ГСЗ: Пр-2, Пр-5, Пр-11 [36.]

ОКЕАНОЛОГИЯ том 65 № 2 2025

Ниже рассмотрим особенности строения структур, обрамляющих ЦББ.

Бенгальский сектор ВИХ. Его изучение методом ГСЗ (профиль М-2, рис. 3) показало, что он сложен субконтинентальной корой мощностью около 20 км [5]. О геологическом строении бенгальского сектора ВИХ можно судить по результатам бурения скважины DSDP-217 (рис. 1). Скважина не достигла кристаллического фундамента, но, судя по скоростному разрезу М-2, он сложен породами. соответствующими верхней части континентальной коры. Скважина была остановлена в кампанских слоях, залегающих в интервале 480-663.5 м, представленных мелом, кремнистыми известняками и сланцами, песчанистыми доломитами и ракушечниковым мелом. В отложениях маастрихтского яруса (420-480 м) вскрыт мел с примесью ракушечников. Кампан-маастрихтские слои содержат также мелководную нанофлору и обильные хорошо сохранившиеся остатки наземных растений. Песчанистые доломиты и ракушечники, слагающие кампанский ярус, относятся к фации рифа. Наличие пелециподовых ракушечников и доломитов указывает на то, что в кампанском веке, включая ранний маастрихт, в этом регионе существовала периодически осушавшаяся лагуна. В позднемаастрихтское время произошли опускания, и субаэральные условия осадконакопления сменились на морские. Перерыв между верхнеэоценовыми и нижнеолигоценовыми отложениями в возрастном диапазоне хорошо ассоциируется с региональным несогласием, которое широко распространенно в отложениях Бенгальского залива. Оно свидетельствует о том, что хребет вновь выступал над поверхностью воды и развивался в субаэральных условиях. Окончательное опускание хребта началось в позднем олигоцене-миоцене. Амплитуда опускания хребта в районе скважины составила 3600 м, из которых около 600 м были компенсированы осадками [9].

Особенности строения Хребта 85° в.д. Результаты изучения Хребта 85° в.д. методом ГСЗ (профиль М-4, рис. 3) позволили выделить в его строении "редуцированную" континентальную кору, характеризующуюся сокращенной мощностью верхнего, среднего и нижнего слоя, общая мощность которых достигает 13 км [6]. Информацию о геологическом строении хребта дает скважина промышленного бурения АА, пробуренная на вершине хребта с отметкой глубины 3000 м [20]. Она расположена примерно в 15–20 км к северу от разреза М-4 (рис. 1). Скважина вскрыла плиоценовые и миоценовые отложения общей мощностью 2500 м. Ниже залегают плотные известняки мощностью 50 м, которые относятся к олигоцену. Эоценовые и палеоценовые отложения отсутствуют, поэтому олигоцен с крупным стратиграфическим несогласием лежит на вулканогенных породах. Их возраст не установлен, но, согласно работе [22], фаза активной вулканической деятельности на хребте приходится на поздний мел (приблизительно от 85 до 80 млн лет назад), причем излияние базальтов происходило преимущественно в субаэральных условиях. Как уже упоминалось в предыдущих статьях [5, 6], сравнение по химическому и изотопному составу базальтов одного возраста, но являющихся сильно контаминированными континентальной корой, не корректно. Согласно изотопному составу Nd базальтов Индийского океана из работ многочисленных авторов [11, 12, 19, 21, 24], базальты являются сильно контаминироваными или "загрязненными" континентальным материалом благодаря присутствию древних континентальных блоков либо континентальной коры под этими океаническими структурами. Термодинамические расчеты и изучение включений в фенокристалах базальтов свидетельствуют о том, что коровая контаминация обычна для океанических базальтов [13, 14]. Такая коровая контаминация зарегистрирована в модельных возрастах, вычисленных по изотопному состава Nd базальтов, и предполагает контаминацию континентальным материалом возраста от 0.8 до 1.6 млрд лет [11, 12, 21], что подтверждает континентальную природу их коровых источников в Индийском океане. Наша интерпретация изотопного состава базальтов согласуется с геофизическими данными. Если учесть, что кровля континентальной коры на разрезе по профилю М-4 расположена на глубине около 7 км, то мощность перекрывающих эффузивов может достигать



Рис. 4. Погребенная карбонатная банка на вершине Хребта 85° в.д. [20].

1.5 км. Мы допускаем, что низкоплотные гранитогнейсовые породы (в совокупности с кислыми эффузивами), так же как на хребте Лакшми в Аравийском море, дают отрицательную гравиметрическую аномалию, которая, как было установлено, имеет континентальную природу [26].

В олигоцене Хребет 85° в.д. развивался преимущественно в субаэральных условиях, благоприятных для формирования карбонатных банок и биогермных построек (рис. 4-5). В это время над поверхностью воды могли выступать острова различных по генезису морфоструктурных форм в виде карбонатных банок, рифовых построек, денудированных конусов потухших вулканов и тектонически раздробленных горстовых блоков. Такая цепь островов, напоминающая дугу протяженного барьерного рифа, простиралась от Восточно-Индийского плато в южном направлении до о. Шри-Ланка и далее, огибая его, соединялась с хребтом Коморин. В миоцене в исследуемом регионе произошли значительные по площади дифференцированные опускания, охватившие Хребет 85° в.д., бенгальский сектор ВИХ и Центрально-Бенгальский бассейн. Окончательное погружение горстовых останцов, структурно связанных с южной частью Хребта 85° в.д., известных в литературе как "частично погруженные холмы" (partly buried hills), произошло значительно позже, около 2-3 млн лет назад в плейстоцене [5].



Рис. 5. Денудированная поверхность одного из горстовых блоков хребта 85° в.д., на котором сохранились фрагменты карбонатных отложений [20].

Особенности строения фундамента котловины Джессор. Котловина Джессор расположена к северу от Центрально-Бенгальской котловины. Она представляет собой самостоятельный развивающийся депоцентр. Фундамент котловины был изучен методом ГСЗ (рис. 1, 3) [36]. Результаты исследований по трем профилям ГСЗ показали, что фундамент в котловине сложен утоненной континентальной корой. На широтном профиле (Пр-11), который проходит вдоль подножья материкового склона, мощность континентальной коры достигает 20 км. На расположенном южнее профиле (Пр-2), который пересекает дно котловины Джессор, мощность коры сокращается до 10-13 км. Глубина залегания границы М закономерно увеличивается в сторону азиатского материка от 25-28 км на Пр-2 до 34 км на Пр-11. Таким образом, данные глубинной сейсмики однозначно свидетельствуют о том, что котловина Джессор была заложена на континентальной коре. Однако следует заметить, что ряд исследователей решительно оспаривают эти результаты, полагая, что в данном регионе, согласно плейттектоническим построениям, должна быть развита древняя океаническая кора [37].

4. СТРОЕНИЕ КОРЫ И ВЕРХНЕЙ МАНТИИ ЦЕНТРАЛЬНО-БЕНГАЛЬСКОГО БАССЕЙНА ПО ДАННЫМ ГЛУБИННОГО СЕЙСМИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

В 2003 г. в Центрально-Бенгальском бассейне с борта НИС "Мезень" с помощью российских автономных донных сейсмических станций (АДСС) был отработан субширотный профиль ГСЗ М-З (рис. 1, 3) [7]. На профиле протяженностью 180 км было расставлено десять ДС с интервалом 20 км. Станции были установлены на ровном дне с изменением глубины с юга на север от 3200 до 3000 м. Длина прострелки составила 250 км, что обеспечило вынос сейсмических возбуждений на 35 км за линию профиля с каждой стороны. Объем группового источника составлял 80 л, а производительность компрессора обеспечила интервал стрельбы 70 с, или приблизительно через 150 м при скорости судна 4 узла. Две ДС на позициях 5 и 8 были утеряны. Остальные 8 ДС зафиксировали преломленные и широкоугольные отраженные сейсмические волны до расстояния 80-200 км от положения станции [7]. Методология построения двумерной скоростной глубинной модели разреза по профилю ГСЗ М-3 была подробно изложена в нашей работе [5].

В южной части профиля в осадочной толще были зафиксированы преломленные волны на расстояниях от 7 до 12 км, в кристаллическом фундаменте — на расстояниях от 12 до 24 км, в нижней части коры — от 22 до 60 км и в верхней мантии (граница М1) — от 40 до 120 км. В первых вступлениях преломленные волны на границе М2 выявляются и прослеживаются от 140 до 200 км.

Отраженные волны в последующих вступлениях прослеживаются от фундамента на расстоянии 0–20 км от положения ДС, от кровли нижней коры (10–40 км), границы М1 (20–80 км) и границы М2 (150–200 км). Вдоль профиля в северном направлении в осадочном слое наблюдается увеличение первых вступлений преломленных волн до 30 км, в то время как дальность прослеживания преломленных волн от фундамента и нижней коры уменьшается.

Таким образом, в строении коры Центрально-Бенгальского бассейна выделяется два структурных этажа. Верхний представлен осадочно-вулканогенными породами. Как отмечалось выше, начало его формирования можно отнести к раннему мелу. Его мощность изменяется от 8 км в южной части разреза до 9 км в северной. Тонким прослоем, который выклинивается в сторону вершины Бенгальского залива, он разделяется на два примерно равных по мощности слоя. В целом, верхний этаж характеризуется спокойным параллельно-слоистым строением при отсутствии признаков складчатости и крупных разрывных тектонических нарушений.

Нижний структурный этаж представлен консолидированной корой мощностью 5-6 км, он имеет общий пологий наклон в сторону депоцентра ЦБК и четко выраженное блоковое строение. Кора характеризуется преобладанием сейсмических скоростей продольных волн в диапазоне 6.5-6.8 км/с, типичных для средней части континентальной коры. Верхний слой континентальной коры со скоростями продольных волн порядка 6.0 км/с на разрезе встречается фрагментарно на вершинах отдельных блоков. По скоростным характеристикам на разрезе в строении коры можно выделить четыре блока, протяженность которых с юга на север изменяется в следующих пределах: 30-70 км, 70-110 км, 110-175 км и 175-230 км. В строении двух блоков, расположенных в северной части разреза, присутствуют фрагменты всех слоев континентальной коры, в том числе коромантийного.

Блоковое строение коры также подчеркивается особенностями строения гравиметрического поля в свободном воздухе, которое характеризуется высокочастотной кривой, не свойственной океанической коре (рис. 6а).

Другой особенностью волновых полей, наблюденных на разрезе, являются необычные для океанов интенсивные отраженные волны во вторых вступлениях. Они связаны со сложно построенной переходной зоной кора—мантия и с градиентной структурой верхней мантии. Наличие двойной границы Мохо М1 и М2 со скоростями 7.9—8.0 км/с и 8.4 км/с характерно для континентальной коры. Нижняя граница М2, по нашему мнению, отражает фазовый переход пород основного состава нижней части континентальной коры в эклогиты, которые характеризуются повышенной плотностью 3.6 г/см³ и более высокой скоростью около 8.4 км/с [8].

Таким образом, консолидированная кора характеризуется исключительно сложной скоростной блоковой структурой и градиентным строением верхней мантии. Практически полное отсутствие верхнего гранитогнейсового слоя можно объяснить денудационными процессами в период геологического развития региона в аэральных и субаэральных условиях не позднее палеозойской эры.

5. ОСОБЕННОСТИ ТЕКТОНИКИ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ БЕНГАЛЬСКОГО ЗАЛИВА

В результате проведенных исследований были получены принципиально новые данные о строении коры и верхней мантии ЦББ. Таким образом, появилась возможность с учетом новых и полученных ранее данных [4-6] построить сводный геолого-геофизический разрез, пересекающий Хребет 85° в.д., ЦББ и бенгальский сектор ВИХ (рис. 7). Обобщенный анализ этих данных свидетельствует о том, что фундамент в центральной части Бенгальского залива сложен корой континентального типа, мощность и скоростные характеристики которой существенно изменяются по латерали. Вдоль профиля изменяется также структура верхней мантии. Выявленные неоднородности свидетельствуют о сложной тектономагматической эволюции дифференцированно



Рис. 6. *а* – График аномалии силы тяжести с редукцией в свободном воздухе [34]. Чередование максимумов и минимумов кривой хорошо коррелируются с блоковой структурой консолидированной коры; *б* – глубинная скоростная модель Центрально-Бенгальской котловины по профилю ГСЗ М-3. Положение профиля см. рис. 1. Сплошные линии – границы, построенные по преломляющим площадкам 1-Д скоростных колонок. Черные цифры – скорость на кровле слоя. Красные цифры – скорость на подошве слоя. Вертикальные штриховые линии – границы блоков, построенные по изменению скоростей на кровле и подошве слоя. Штриховая линия – предполагаемое продолжение границы М2. LCL – слой нижней коры с аномально высокой скоростью.



Рис. 7. Широтный геолого-геофизический разрез, построенный с учетом данных ГСЗ, мигрированных во временную область, и МОВ-ОГТ. В качестве опорного принят разрез по профилю SK 107–07: *1* – слой воды; *2* – осадочный слой; *3* – вулканогенно-осадочный слой; *4* – фундамент, сложенный континентальной корой; *5* – Мохо М1; *6* – Мохо М2.

погрузившейся восточной части Индийской палеоплатформы, реликтовыми фрагментами которой являются Хребет 85° в.д., ЦББ и бенгальский сектор ВИХ.

Ниже, в качестве нашей рабочей гипотезы, рассмотрим историю тектонического развития Бенгальского залива (БЗ).

1. С большой долей вероятности можно утверждать, что на месте БЗ существовала "древняя суша" — Бенгальское поднятие. Его деструкция была вызвана внедрением в кору плюма разогретой верхней мантии. В результате сложных тектономагматических процессов произошло преобразование континентальной коры в кору переходного типа и последующее ее погружение (механизм погружения был рассмотрен в статье).

2. В палеозое Бенгальское поднятие представляло собой область с высокогорным рельефом, откуда происходил снос валунно-галечных аллювиально-ледниковых отложений т. н. "гондванской серии". В ходе длительной геологической эволюции горный рельеф не позже начала мела был снивелирован, и практически полностью денудирован верхний гранитогнейсовый слой континентальной коры. Его фрагменты сохранились на Восточно-Индийском плато, он вскрыт бурением на горстовом блоке в западной части БЗ. По геофизическим данным он присутствует также в строении северной части Хребта 85° в.д. Поэтому не исключено, что локальные выходы низкоплотных кислых эффузивов и гранитогнейсовых пород дают отрицательную гравиметрическую аномалию типа "bull-eye shaped" [35], загадочная природа которой привлекает пристальное внимание многих исследователей.

3. Деструктивные рифтогенные процессы, которые произошли по периферии Бенгальского поднятия, привели к образованию системы горст-грабеновых структур, положивших начало формированию восточной материковой окраины Индии и осадочных бассейнов Годавари-Кришна, Маханади и др. Строение осадочной толщи свидетельствует о том, что в перми-триасе они развивались преимущественно в континентальных условиях. Морская фаза седиментогенеза наступила в юре — раннем мелу.

4. В меле-палеоцене в Индийском океане произошли обширные излияния базальтовых лав, так называемый "базальтовый потоп". На Индийской платформе произошло образование трапповой провинций Декан и Раджмахал. Проявление магматизма установлено также в Бенгальском заливе.

5. Следующая фаза развития характеризуется проявлением дифференцированных тектонических движений, в результате которых были заложены основные структурные элементы фундамента БЗ. В конце олигоцена Хребет 85° в.д. и бенгальский сектор ВИХ испытали устойчивое опускание и были погребены под отложениями Бенгальского конуса выноса. Это было время, когда обширные площадные опускания охватили значительную часть БЗ.

6. Новейшая фаза тектонической активизации (поздний миоцен—плиоцен) завершила формирование современного структурного плана фундамента БЗ. Однако, судя по проявлению современной тектонической активности в западной части БЗ, окончательное формирование восточного материкового склона Индии еще не закончено.

6. ВЫВОДЫ

Изложенный в статье материал позволяет сделать следующие выводы.

1. Кристаллический фундамент в Центрально-Бенгальском бассейне сложен континентальной, а не океанической корой. 2. Центрально-Бенгальский бассейн и обрамляющие его горстовые структуры Хребет 85° в.д. и бенгальский сектор Восточно-Индийского хребта представляют собой погрузившиеся реликтовые фрагменты восточной части Индийской палеоплатформы.

3. Окончательное погружение горстовых структур произошло в новейшую фазу тектонической активизации в миоцен-плейстоценовое время.

Источники финансирования. Работа выполнена в рамках госзадания Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН (тема FMWU-2022-0010) и госзадания Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН (тема № FMWE-2024-0026).

Благодарности. Авторы глубоко признательны И.Н. Пономаревой (ПГО "Южморгеология", г. Геленджик) за предоставленную возможность ознакомиться с первичным геолого-геофизическим материалом из фондов предприятия. Авторы также выражают благодарность Н.И. Павленковой, Е.А. Долгинову и С.Н. Кашубину за ценные советы при обсуждении вопросов, затронутых в статье.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. *Артюшков Е.В.* Механизм образования глубоких впадин на континентах. Баренцевский прогиб // Докл. РАН. 2004. Т. 396. № 5. С. 644–649.
- 2. Артюшков Е.В., Егоркин А.В. Физический механизм образования сверхглубоких осадочных бассейнов. Прикаспийская впадина// Докл. РАН. 2005. Т. 400. № 4. С. 494–499.
- 3. Артюшков Е.В., Смирнов О.Е., Чехович П.А. Континентальная кора в западной части амеразийского бассейна. Механизм погружения // Геология и геофизика. 2021. Т. 62. № 7. С. 885–901.
- 4. Илларионов В.К., Бойко А.Н., Удинцев Г.Б. Морфоструктура дна Бенгальского залива (Индийский океан), проблема его происхождения // Физика Земли. 2016. № 3. С. 50–67.
- 5. Илларионов В.К., Ганжа О.Ю., Ильинский Д.А. и др. Природа земной коры южной части Бенгальского залива и прилегающей части Центральной котловины (Индийский океан) // Геофизические процессы и биосфера. 2022. Т. 21. № 3. С. 75–97.
- 6. Илларионов В.К., Ганжа О.Ю., Ильинский Д.А. и др. Новые представления о строении и природе коры западной части Бенгальского залива по данным глубинной сейсмики // Океанология. 2024. Т. 64. № 3. С. 526–541.
- 7. Непрочнов Ю.П., Ганжа О.Ю., Ильин И.А. Методика обработки и интерпретации записей донных

сейсмографов при глубинном сейсмическом зондировании в океане // Океанология. 2005. Т. 45. № 3. С. 458–467.

- 8. *Павленкова Н.И*. Структурные особенности литосферы континентов и океанов и их природа // Геофизический журнал. 2019. Т. 41. № 2. С. 3–57.
- 9. Рудич Е.М. Движущиеся материки и эволюция океанического ложа. М.: Недра, 1983. 272 с.
- Bandyopadhyay S. Evolution of the Ganga Brahmaputra Delta: A Review // Geographical Review of India. 2007. V. 69. P. 235–268.
- Borisova A.Y. Subalkaline series of the Afanasij Nikitin Seamount, Indian Ocean: Magma genesis and secondary alterations of basalts // Geochemistry International. 2001. V. 39. P. 123–135.
- Borisova A.Y., Belyatsky B.V., Portnyagin M.V., Sushchevskaya N.M. Petrogenesis of Olivine-phyric Basalts from the Aphanasey Nikitin Rise: Evidence for Contamination by Cratonic Lower Continental Crust // J. of Petrology. 2001. V. 42. P. 277–319.
- Borisova A.Y., Faure F., Deloule E. et al. Lead isotope signatures of Kerguelen plume-derived olivine-hosted melt inclusions: Constraints on the ocean island basalt petrogenesis // Lithos. 2014. V. 198. P. 153–171.
- Borisova A.Y., Bohrson W.A., Grégoire M. Origin of primitive ocean island basalts by crustal gabbro assimilation and multiple recharges of plume-derived melts // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2017. V. 18. P. 2701–2716.
- Brune J.N., Singh D.D. Continent-like crustal thickness beneath the Bay Bengal sediments // Bull. Seismol. Soc. Am. 1986. V. 76. № 1. P. 191–203.
- Curiale J.A., Covington G.H., Shamsuddin A.H.M. et al. Origin of petroleum in Bangladesh // AAPG Bulletin. 2002. V. 86. № 4. P. 625–652.
- Curray J.R., Emmel F.J., More D.G., Raitt R.W. Structure, tectonics and geological history of the northeastern Indian Ocean // Ocean Basins and Margins. 1982. V. 6. P. 399–450.
- Dubey C.P., Tiwari V.M. Lithospheric-mantle modification beneath the thick sedimentary fan of Bay of Bengal: Inference from the 3D gravity model // Tectonophysics. 2022. V. 826. P. 1–14.
- Frey F.A., Weis D., Borisova A.Y., Xu G. Involvement of continental crust in the formation of the Cretaceous Kerguelen Plateau: New perspectives from ODP Leg 120 sites // J. of Petrology. 2002. V. 43. P. 1207–1239.
- Gorain S., Sachdeva H. Mystery beneath the 85° E Ridge // 12th Biennial Int. Conf. Expo. SPG-India, Jaipur, 2017.
- Gupta P., Rathore S.S., Raza S. et al. Isotopic and Geochemical Evidences from 85° E Ridge: Implications on Kerguelen Hotspot Linkage // 11th Biennial International Conference & Exposition. JAIPUR–2015.
- 22. Ismaiel M., Krishna K.S., Srinivas K. et al. Internal structure of the 85° E Ridge, Bay of Bengal: Evidence

ОКЕАНОЛОГИЯ том 65 № 2 2025

for multiphase volcanism // Marine and Petroleum Geology. 2017. V. 80. P. 254–264.

- Ismaiel M., Krishna K. The 24 August 2021 Mw 5.1 Earthquake, 320 km northeast of Chennai, India: Brittle Rupture of a Fault Line // Current Science. 2021. V. 121. P. 1005–1006.
- Kent R.W., Pringle M.S., Müller R.D. et al. ⁴⁰Ar/³⁹Ar geochronology of the Rajmahal basalts, India, and their relationship to the Kerguelen Plateau // Journal of Petrology. 2002. V. 43. P. 1141–1153.
- Krishna K.S., Ismaiel M., Srinivas K. et al. Sediment pathways and emergence of Himalayan source material in the Bay of Bengal // Current Science. 2016. V. 110. P. 363–371.
- Krishna K.S., Ismaiel M., Srinivas K. Oceanic rocks beneath the landmass and continental rocks below the ocean – geological complexities in Indian waters // Current Science. 2020. V. 119. P. 896–898.
- Laju M., Krishna K.S. Dating of the 85° E Ridge (northeastern Indian Ocean) using marine magnetic anomalies // Current Science. 2021. V. 100. P. 1314–1322.
- Mooney W.D., Kaban M.K. The North American upper mantle: Density, composition, and evolution // J. Geophys. Res. Solid Earth. 2010. V. 115. P. 1–24.
- 29. Naini B.R., Leyden R. Ganges Cone: A Wide-Angle Seismic Reflection and Refraction Study // J. Geophys. Res. 1973. V. 78. № 35. P. 8711–8720.
- 30. Pateria M.L., Rangaraju M.K., Raiverman V. A Note on the Structure and Stratigraphy of Bay of Bengal Sedi-

ments // Geological survey of India. Special publication. 1992. \mathbb{N} 29. P. 21–23.

- Peirce J.W. The northward motion of India since the late Cretaceous // Geophys. J.R. Astron. Soc. 1978. V. 52. P. 277–311.
- Rao D.G, Krishna K.S., Sar D. Crustal evolution and sedimentation history of the Bay of Bengal since the Cretaceous // J. Geophys. Res. 1997. V. 102. № B8. P. 17747–17768.
- Radhakrishna M., Subrahmanyam C., Damodharan T. Thin oceanic crust below Bay of Bengal inferred from 3D-gravity interpretation // Tectonophysics. 2010. V. 493. P. 93–105.
- 34. *Sandwell D.T.* New global marine gravity map/grid based on stacked ERS1, Geosat and Topex altimetry // EOS Transactions, American Geophysical Union. 1994. V. 75. № 16. P. 321.
- 35. Shang L., Hu G., Pan J. et al. Hotspot volcanism along a leaky fracture zone contributes the formation of the 85° E Ridge at 11° N latitude, Bay of Bengal // Tectonophysics. 2022. V. 837. P. 1–14.
- Sibuet J.-C., Klingelhoefer F., Huang Y.-P. et al. Thinned continental crust intruded by volcanics beneath the northern Bay of Bengal // Marine Petroleum Geology. 2016. V. 77. P. 471–486.
- Talwani M., Krishna K.S., Ismaiel M., Desa M.A. Comment on a paper by Sibuet et al. entitled "Thinned continental crust intruded by volcanics beneath the northern Bay of Bengal" // Marine and Petroleum Geology. 2016. V. 88. P. 1123–1125.

STRUCTURE OF THE EARTH'S CRUST AND TECTONIC EVOLUTION OF THE CENTRAL BENGAL BASIN V. K. Illarionov^a, O. Y. Ganzha^b, D.A. Ilyinsky^b, K.A. Roginskiy^b, L.D. Fleifel^a, A.Y. Borisova^c

^a Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
 ^b Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
 ^c Institute of Geological and Environmental Sciences in Toulouse, Toulouse, France
 *e-mail: vkillar@mail.ru

A comprehensive analysis of geological and geophysical data characterizing the structure of the Central Bengal Basin (CBB) and its framing structures was carried out. For the first time, a submeridional section of the deep seismic sounding crossing the CBB was presented. It is found that the consolidated crust in the CBB has a complex block structure. The velocity characteristics of the basement and the gradient two-layer structure of the upper mantle unambiguously indicate that the basin was formed on continental rather than oceanic crust. The mechanism of the CBB basement sinking, the amplitude of which reaches 11 km, may be the compaction of the basic rocks of the lower part of the continental crust at its contact with the heated upper mantle and the transition of gabbroid rocks into eclogites with density of (3.6 g/cm^3) which is higher than that of mantle peridotites (3.3 g/cm^3) . We conclude that the CBB, the 85° E Ridge, and the Bengal sector of the East Indian Ridge are relict fragments of the differentially submerged eastern part of the Indian paleocontinent.

Keywords: continental crust, differentiated tectonic movements, Moho boundary, velocity section, Nd iso-tope composition, basalt, Indian ocean