

НЕОТЕКТОНИКА ЗОНЫ ПЕРЕХОДА ОКЕАН-КОНТИНЕНТ В РАЙОНЕ КОТ Д'ИВУАРА (ЗАПАДНАЯ АФРИКА)

© 2024 С.Ю. Соколов¹, Диоманде Мамаду², Eby Ama Yvonne Ednard³, Mouah Raymond⁴

¹Геологический институт РАН, Москва, Россия, 119017

²Российский Университет дружбы народов, Москва, Россия, 117198

³National Company of Petroleum Operations of Cote d'Ivoire (PETROCI), Abidjan, Cote d'Ivoire, 8XHG+4M

⁴Panafrican Energy Services, Abidjan, Cote d'Ivoire, 924M+WJ;

e-mail: sysokolov@yandex.ru

Поступила в редакцию 21.01.2024; после доработки 08.04.2024; принята в печать 25.06.2024

Тектонические и геофизические элементы-индикаторы в районе континентальной окраины Кот д'Ивуар представлены в трех взаимодействующих между собой зонах: океанической, континентальной и переходной. Вместе с переменным во времени гравитационным полем они образуют систему, неотектонические процессы в которой усилены за счет их экваториального положения. Сейсмичность представлена плотными кластерами событий в районах сочленения океанских трансформных разломов Страхова, Сан-Паулу и Романш с континентом и их сухопутного продолжения. Сейсмичность и вариации силы тяжести показывают связь глубинных плотностных изменений с разрядкой напряжений в районе и воздействием объемных сил на литосферные блоки. Аномалии в свободном воздухе и изостазии вдоль шельфа сегментированы воздействием вертикальных движений. Депрессии пулл-апарт около пассивных частей трансформных разломов в гравитационных аномалиях указывают на деформации фундамента в межразломных блоках и активацию сдвиговых смещений правой кинематики около изгиба пассивных частей разломов к северо-востоку. Сегментам с максимумами изостазии на шельфе соответствуют области с более крупнозернистым гранулометрическим составом, что указывает на вымывание тонкой осадочной фракции из донного материала.

Ключевые слова: Кот-д'Ивуар, неотектоника, сейсмичность, вариации силы тяжести, гранулометрия осадков.

ВВЕДЕНИЕ

Район исследований расположен в зоне перехода океан-континент в пределах мезозойско-кайнозойского осадочного бассейна на юге Кот д'Ивуара (Западная Африка) (рис. 1) и примыкающей к нему части глубоководной Гвинейской котловины Атлантического океана. Прилегающая к Кот д'Ивуару акватория расположена в пределах океанической окраины, сегментированной восточными пассивными частями мегатрансформных разломных систем Романш и Сан-Паулу, которые при сочленении с шельфом меняют азимут ориентации с $\sim 80^\circ$ на $\sim 65-70^\circ$ и по пространственной конфигурации имеют континентальное продолжение. Наличие неотектонической активности подтверждается проявлением внутриплитной сейсмичности на

суше и на акватории в пассивных частях разломных систем по данным (Mbossi et al., 2021) с использованием международных и региональных каталогов USGS, ISC, IRIS и BGS и отдельно каталога ISC (ISC..., 2023) (рис. 2). Кластеры сейсмических событий имеют пространственную конфигурацию, указывающую на привязку к наземно-морским разломным системам мезозойского и докембрийского возраста.

Разномасштабные разрывные структуры встречаются также в осадочном чехле кайнозойского осадочного бассейна Кот д'Ивуара над сдвиговыми зонами в акватории и в кристаллических породах на континентальной окраине с формированием типичного парагенеза бассейнов пулл-апарт (Kouame et al., 2018). Было предложено несколько механизмов образования подобных бассейнов в регионе (An, Sammis, 1996).

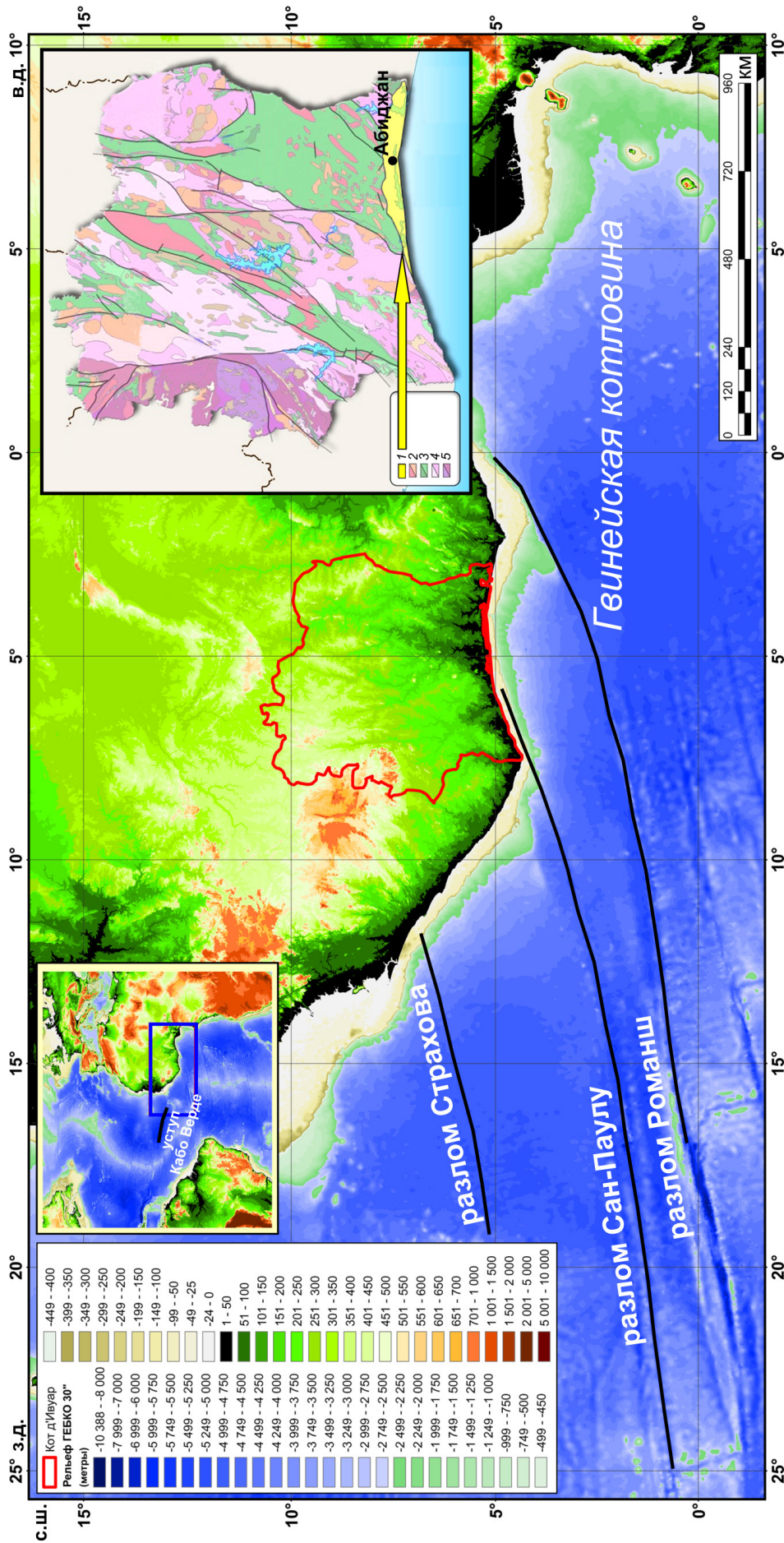


Fig. 1. Topography of West Africa and bathymetry of the Atlantic after (GEBCO, 2014), the position of the Romanche and San-Paulu megatransform fault systems, and the contour of Côte d'Ivoire. The insets shows the position of the Atlantic as a whole (left) and a simplified geological map of Côte d'Ivoire (right). 1 — sedimentary basin K₁-Q (yellow contour); 2 — igneous rocks of the post-Birimian complex; 3 — sedimentary and igneous rocks of the Birimian complex (2.2-2.1 Ga); 4 — granite massifs; 5 — Archean basement.

Fig. 1. Рельеф Западной Африки и батиметрия Экваториального сегмента Атлантики по данным (GEBCO, 2014), положение мегатрансформных разломных систем Романш и Сан-Паулу и контур Кот д'Ивуара. На врезках показаны положение планшета карты относительно Атлантики в целом (слева) и упрощенная геологическая карта Кот д'Ивуара (справа). 1 — осадочный бассейн K₁-Q (желтый контур); 2 — магматические породы постбиримийского комплекса; 3 — осадочные и магматические породы биримийского комплекса (2.2—2.1 млрд лет); 4 — гранитные массивы; 5 — архейский фундамент.

НЕОТЕКТОНИКА ЗОНЫ ПЕРЕХОДА ОКЕАН-КОНТИНЕНТ

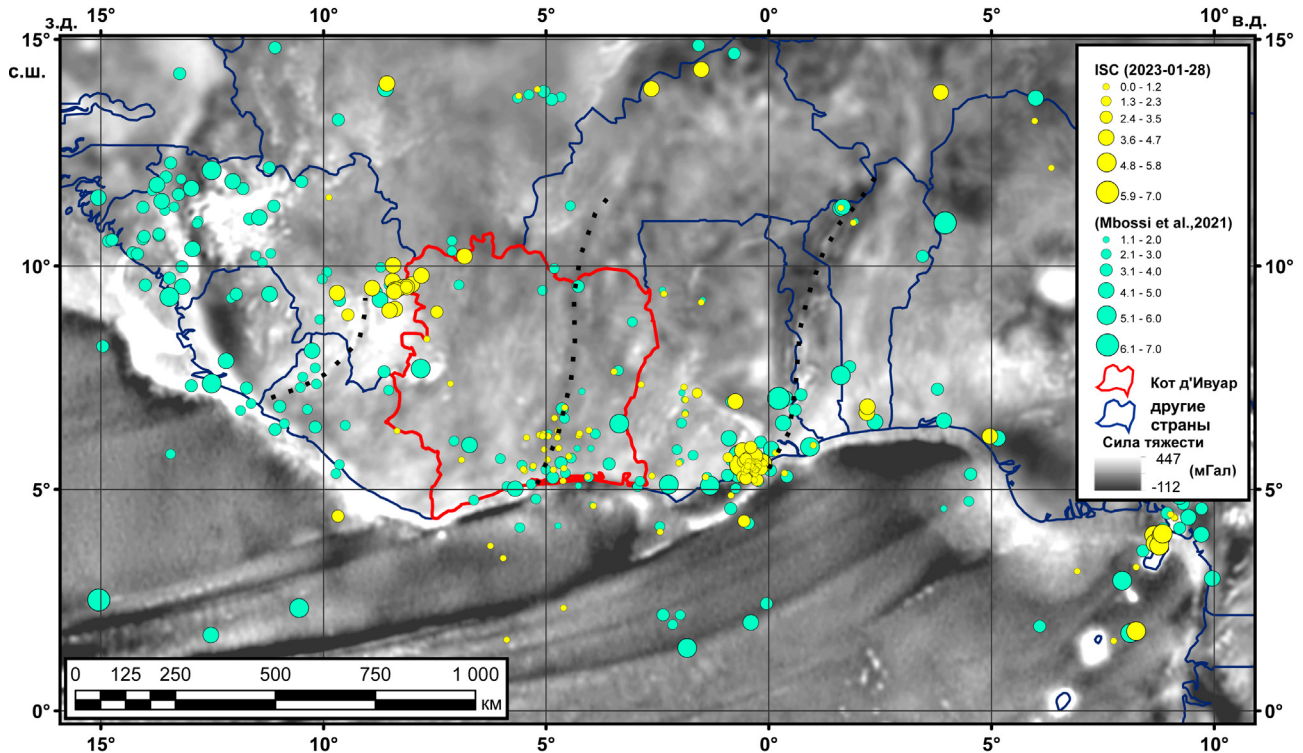


Рис. 2. Сейсмичность Западной Африки по данным международных и региональных каталогов ISC (ISC..., 2023) и каталогов USGS, ISC, IRIS и BGS (Mbossi et al., 2021). В качестве топоосновы использованы аномалии силы тяжести в свободном воздухе по данным (Sandwell, Smith, 2009). Пунктиром показаны направления оперения океанских трансформных разломов на прилегающей континентальной части.

Fig. 2. Seismicity of Western Africa according to the ISC international and regional catalog (ISC..., 2023) and USGS, ISC, IRIS and BGS catalogs (Mbossi et al., 2021). Free air gravity anomalies from (Sandwell, Smith, 2009) are used as topographic base. The dotted line shows splay faults of the oceanic transform faults in the continental area.

Наиболее обоснованным является локальное растяжение между двумя или более сегментами сдвиговых нарушений кулисообразного фундамента. В качестве альтернативы был предложен механизм простого сдвига и механизм сколов Риделя (Hagglauer-Ruppel, 1991), который формирует локальные области растяжения около их плоскостей в осадочном чехле. Они субпараллельны направлению главного магистрального сдвига в фундаменте. Сначала возникают сколы Риделя, а на более поздней стадии развиваются сдвиговые сегменты единого разрыва, приводя к образованию условий для локальных осадочных депоцентров.

Указанная система разломов в океанической части, кристаллических блоках континентальной окраины и осадочном чехле при геодинамическом воздействии на литосферу со стороны комбинации движущих сил плейт-тектоники и объемных сил на вращающемся сфероиде (Соколов, 2018), подвержена реактивации (Nkodia et al., 2022). При ней возникают условия транспрессии в области сочленения океанских трансформных разломов с континентальной окраиной, трансформирующиеся в сжатие и транстенсию на продолжении разломной сети в континент,

которые приводят к возникновению сильных событий (Nkodia et al., 2022). Кроме сейсмичности неотектоническая активность проявлена и связана с переменными во времени данными спутниковой миссии GRACE (Landerer, 2021; Landerer, Swenson, 2012), данными гравитационных изостатических аномалий, указывающих на потенциал вертикальных смещений, а также данными о современном осадконакоплении в областях неотектонической активности и данными геоморфологии. Анализу этой совокупности фактов посвящена настоящая работа.

ТЕКТОНИЧЕСКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ РЕГИОНА

Тектоническая эволюция мезо-кайнозойского осадочного бассейна Кот д'Ивуара (K_1-Q) (рис. 1) проходила на фундаменте архейского возраста, магматических и осадочных пород биримианского (2.2–2.1 млрд лет) и постбиримианского комплексов и гранитных массивов, а также новообразованного океанического фундамента. Она реконструирована в работах (Antobreh et al., 2009; Martin, 1973; Tastet, 1979). Заложение осадочного бассейна начинается

в середине мелового периода при расколе Гондваны между Западной Африкой и Южной Америкой. Раскол начался в раннем меловом периоде по классической схеме внутрикратонного рифтогенеза (Gorini, 1981). Формирование Ивуарийской океанической окраины происходило в структурных рамках трансформных разломов Сан-Паулу и Романш. Они ограничивают ромбовидный осадочный бассейн типа пулл-апарт (Blarez, 1986). Структурирование Ивуарийского осадочного бассейна разделено на четыре фазы (Sombo, 2002):

- фаза барремско-альбского рифтогенеза: она отмечена накоплением осадков, несогласно залегающих на фундаменте, разделенном на грабены и горсты;

- начальная фаза образования океанической депрессии датируется сеноманом-сеноном (в нижнем сеноне на кровлях блоков видны поверхности мелководной морской эрозии);

- фаза максимального развития океанической депрессии начинается с кампана по маастрихт (она также отмечена временем окончания меловой паузы инверсий магнитного поля Земли и соединения рифтовых системы Южной и Северной Атлантики);

- завершающая фаза формирования океанической депрессии в кайнозое ознаменовалась дальнейшим расширением Атлантического океана.

Тектонические нарушения, сформированные в процессе эволюции региона, реактивируются и являются местом разрядки напряжений, возникающих из-за действия современных геодинамических факторов.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

Неотектоника региона выражена, прежде всего, в сейсмичности переходной зоны океан-континент на суше и акватории по данным международных и региональных каталогов USGS, ISC, IRIS и BGS (Mbossi et al., 2021). Композитная выборка этих каталогов показана на рис. 2. Там же приведена отдельная выборка по данным каталога ISC (ISC..., 2023). При визуализации обеих выборок проводилось масштабирование символов по магнитуде. Данные ISC отдельно использовались для анализа временной вариации сейсмического цикла и ее сравнения с изменением во времени параметров спутниковых данных GRACE.

Временные данные GRACE использовались в объединенном Grace/Grace-FO представлении из ресурса общего доступа (<https://grace.jpl.nasa.gov/data-analysis-tool/>) (Landerer, 2021; Landerer, Swenson, 2012) с апреля 2002 по июль 2022 года в осредненном по месячным интервалам вре-

мени виде для сухопутной ячейки с границами от 6° с.ш. до 7° с.ш. и от 5° з.д. до 4° з.д. Пространственные grids вариаций силы тяжести GRACE для осредненных месячных интервалов получены по данным на сетке 0.25 дугового градуса (Wiese et al., 2023) из ресурса общего доступа (https://www2.csr.utexas.edu/grace/RL0602_mascons.html). По этим данным проводилось выборочное построение карт на район исследований и временного графика значений для опорной площадки 1°×1°, находящейся на территории Кот д'Ивуар.

Данные по аномалиям гравитационного поля в свободном воздухе на сетке в 1'×1' взяты из работы (Sandwell, Smith, 2009) в версии 24 (https://topex.ucsd.edu/marine_grav/mar_grav.html). Они использовались для визуализации структурных неоднородностей в зоне сочленения трансформных разломов с континентом. Изостатические аномалии на сетке 2'×2' для иллюстрации потенциала вертикальных движений в регионе в зависимости от избытка или недостатка масс над компенсационной поверхностью были взяты из работы (Balmino et al., 2012) (<https://bgi.obs-mip.fr/data-products/grids-and-models/wgm2012-global-model/>).

Карта распределения гранулометрии и состава донных осадков шельфа Кот д'Ивуар получена из работы (Martin, 1973). Данные по конфигурации каньона Тру-Сан-Фон и изменению положения береговой линии получены из работы (Vanneu, Mascle, 1992).

РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА ДАННЫХ

Сейсмичность в пространстве. Анализ пространственного распределения сейсмичности по композитным данным разных каталогов (рис. 2) показывает наличие плотных кластеров событий в районах сочленения трансформных разломов с континентом и разворота линейных разломных структур, выраженных в гравитационных аномалиях, в северо-восточную ориентацию, выходящую на сушу и имеющую форму оперения при сдвиговом парагенезе. Сдвиг, вероятнее всего, имеет правую кинематику из-за разворота набора субпараллельных пассивных частей трансформных разломов к северу. На это также указывают азимуты горизонтального смещения станций GPS в пунктах YKRO (Кот д'Ивуар) и BJCO (Гана) (<https://sideshow.jpl.nasa.gov/post/series.html>) (GPS, 2022), равные ~50° и расположенные на северных крыльях оперяющих разломных систем.

Отмеченная конфигурация сейсмических кластеров наблюдается для восточных продолжений трансформных разломов Страхова, Сан-Паулу и Романш (рис. 1), от которых, начиная

с переходной зоны вглубь континента, идут линейные элементы со слабой кривизной переменного знака (рис. 2, пунктирные линии). На территории Кот д'Ивуара они соответствуют разломным системам, смещающим древние комплексы пород (рис. 1), которые по данным (Nkodia et al., 2022) могут реактивироваться при современном внутриплитном геодинамическом воздействии. Вне указанных особенностей сейсмичность интенсивно проявлена вдоль Камерунской линии вулканов и в ряде случаев вдоль пассивных частей трансформных разломов в океане, где наблюдается их разворот от субширотного простирания к более северным румбам.

Сейсмичность во времени. Анализ сейсмической активности в районе исследований во времени начиная с 2002 г. (время начала измерений в рамках проекта GRACE) (рис. 3, позиция I) показывает два «широких» экстремума в 2011 и 2019 гг. с увеличенной магнитудой и частотой событий, разнесенные на интервал ~10 лет. Интерпретация природы этих вариаций возможна с привлечением измерений независимых параметров, имеющих сходную временную зависимость. Таковыми являются данные проекта GRACE (рис. 3, позиция II), физический смысл которых состоит в мощности водного слоя с единичной плотностью, эквивалентного изменению плотности и соответственно силы тяжести, измеряемого в сантиметрах. За период наблюдений с 2002 г. эти вариации в районе исследований также имеют два экстремума на тех же временах, что и сейсмичность (рис. 3, позиция II). Отмечается значительный вклад годовых вариаций, связанных с вращением сфероида, но при этом очевиден тренд не связанный с годичным циклом. Осреднение значений в 20-ти месячном окне (рис. 3, пози-

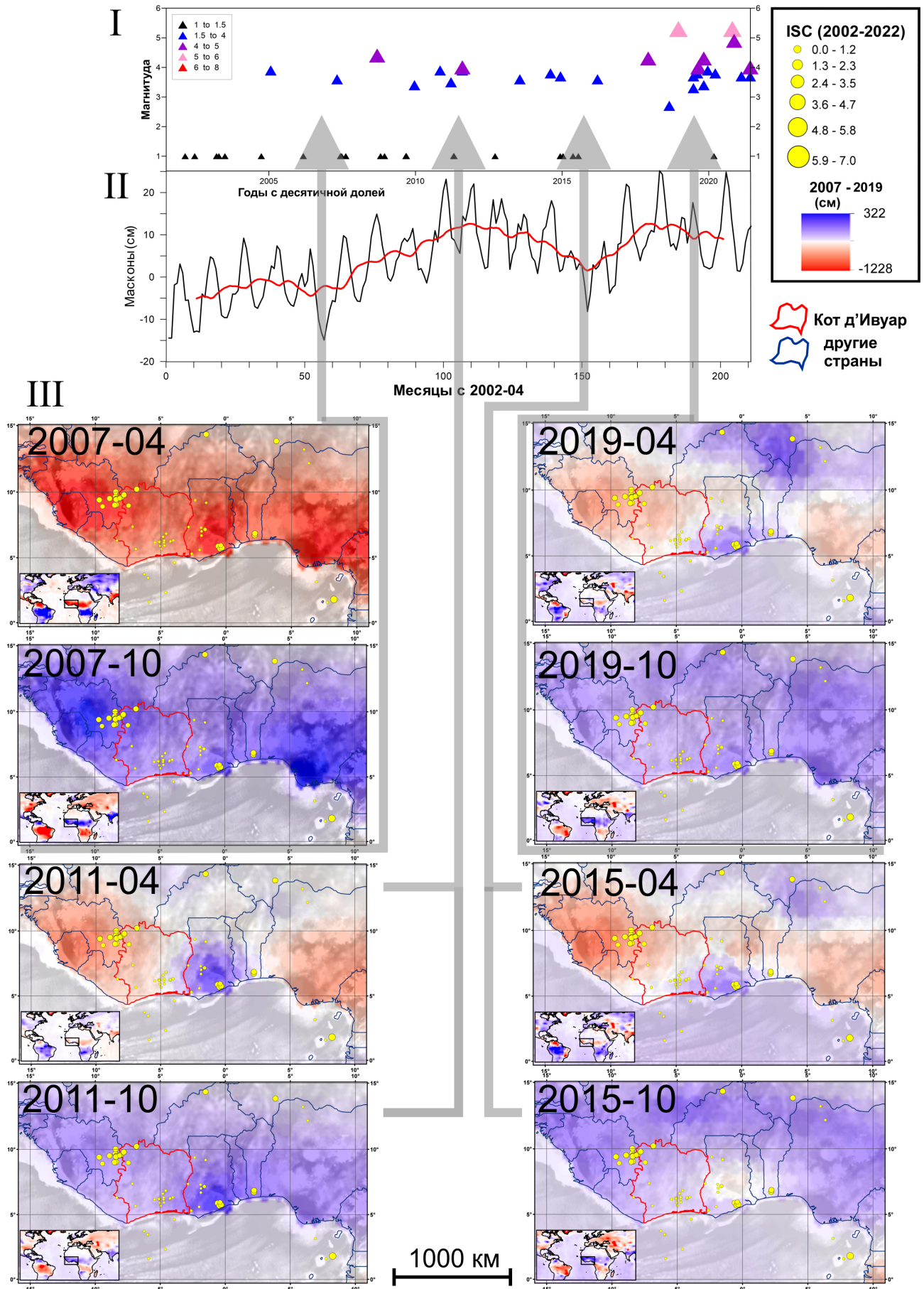
ция II) показывает тренд в отфильтрованном от годовой частоты виде и его сопоставление с временным ходом сейсмичности (рис. 3, позиция I) показывает совпадение и наличие причинно-следственной связи анализируемых параметров. Тем не менее, есть возможность, что связь между ними является парагенетической — оба параметра могут быть следствием другого явления, не включенного в анализ.

Вариации силы тяжести. Вариации силы тяжести во времени, показывающие экстремумы на временах в ~2011 и ~2019 гг. (рис. 3, позиция II), также имеют промежуточные минимумы в ~2007 и ~2015 гг. Рассмотрим для этих четырех моментов времени пространственное распределение вариаций в районе исследований (рис. 3, позиция II). Карты этого параметра приведены для весенне-осенних (апрель-октябрь) пар, поскольку особенностью его распределения является повышенная концентрация в приэкваториальной области с переменной полярности от весны к осени и т.д. Это видно на более мелко-масштабном отображении на врезках к картам, где тенденция появления экстремумов вариаций около экватора на всех континентах проявлена с очевидностью.

Наиболее однородное поле вариаций наблюдается в момент минимума 2007 года (рис. 3, позиция III). Весна характерна ровными отрицательными значениями на континенте, а осень — положительными. Наблюдаются небольшие вариации в районе Гвинеи, на побережье Ганы и в области конуса выноса р. Нигер. Территория Кот д'Ивуара расположена в области перехода между двумя западными вариациями. Пара 2011 года (см. рис. 3, позиция II), соответствующая временному максимуму (рис. 3, позиция II), отличается появлением дифференциации поля

Рис. 3. Сейсмичность по данным (ISC..., 2023) и вариации силы тяжести в пространстве и времени по данным GRACE (Landerer, 2021; Landerer, Swenson, 2012; Wiese et al., 2023). Серые стрелки показывают привязку весенне-осенних (апрель-октябрь) пар пространственного распределения вариаций силы тяжести к их положению на временном графике для ячейки с границами от 6° с.ш. до 7° с.ш. и от 5° з.д. до 4° з.д. (центральная часть Кот д'Ивуара). I — распределение магнитуд сейсмичности по данным (ISC..., 2023) в рамках планшета района исследований в зависимости от времени с апреля 2002 года; II — распределение значений вариаций в сантиметрах по данным GRACE (Landerer, 2021; Landerer, Swenson, 2012; Wiese et al., 2023) в зависимости от времени с апреля 2002 года (черная линия) и в сглаженном виде в бегущем окне 20 месяцев для устранения годичных вариаций (красная линия); III — пространственные пары (апрель-октябрь) распределения вариаций для 2007, 2011, 2015 и 2019 гг. в районе исследований с привязкой к их положению на временном графике вариаций.

Fig. 3. Seismicity from data of ISC catalog (ISC..., 2023) and spatial and temporal gravity field variations from GRACE data (Landerer, 2021; Landerer, Swenson, 2012; Wiese et al., 2023). Gray arrows show the link of spring-autumn (April-October) pairs of spatial variations distribution to their position on time plot of the variations for the area with limits from 6°N to 7°N and from 5°W to 4°W (central part of Côte d'Ivoire). I — seismic magnitude distribution from data of (ISC..., 2023) within the studied area as a function of time since April 2002; II — variation of gravity values distribution (centimeters) from data of GRACE (Landerer, Swenson, 2012; Landerer, 2021; Wiese et al., 2023) as a function of time since April 2002 (black line) and smoothed by a moving window of 20 months to remove annual variations (red line); III — spatial pairs (April-October) of variations distributions for 2007, 2011, 2015 and 2019 in the study area their positions referenced on the temporal variations plot.



вариаций в пределах приэкваториальной полосы в весенний период, и, в меньшей степени, в осенний. Появление пространственного субширотного градиента плотностных вариаций коррелируется во времени с наблюдаемым максимумом сейсмичности. Пара 2015 г. (рис. 3, позиции I и III) по времени соответствует минимумам сейсмической активности и амплитуды вариаций (рис. 3, позиции I и II) и имеет менее контрастную дифференциацию весеннего и осеннего распределения по сравнению с парой 2011 г. Пара 2019 года (рис. 3, позиция III) представлена наиболее контрастным знакопеременным полем по сравнению с однородными значениями 2007 г. и по времени совпадает с ростом сейсмической активности и максимумом сглаженной кривой вариаций силы тяжести, смещенным от побережья Гвинейского залива на север вглубь континента.

Аномалии силы тяжести, изостазия и донные осадки. Аномалии силы тяжести в свободном воздухе в районе исследований (рис. 4, позиция I) имеют ряд отклонений от стандартной структуры, наблюдаемой в большинстве шельфов планеты. Цепочка краевых максимумов около бровки шельфа прерывается субширотными минимумами в районе мезо-кайнозойского осадочного бассейна Кот д'Ивуар (рис. 1) и плато Ганы. Поле аномалии сегментировано вдоль шельфа на четко различимые блоки с контрастными значениями в пределах ± 50 мГал (рис. 4, позиция I). Эта сегментация вдоль шельфа сохраняется в изостатических аномалиях (рис. 4, позиция II), но конфигурация этой редукции сильно меняется при переходе от континентального склона в котловину. В частности, выделяемые в аномалиях в свободном воздухе депрессии с геометрией пулл-апарт (рис. 4, позиция I), примыкающие в котловинах с севера к трансформным разломам Сан-Паулу и Романш, практически теряют свою выраженность в изостатических аномалиях. Анализ карты состава донных осадков по (Martin, 1973) показывает что сегментация, полученная

по данным геофизических полей, сохраняется в структуре донных осадков, разделяя провинции с резко отличающимся гранулометрическим составом (рис. 4, позиция III).

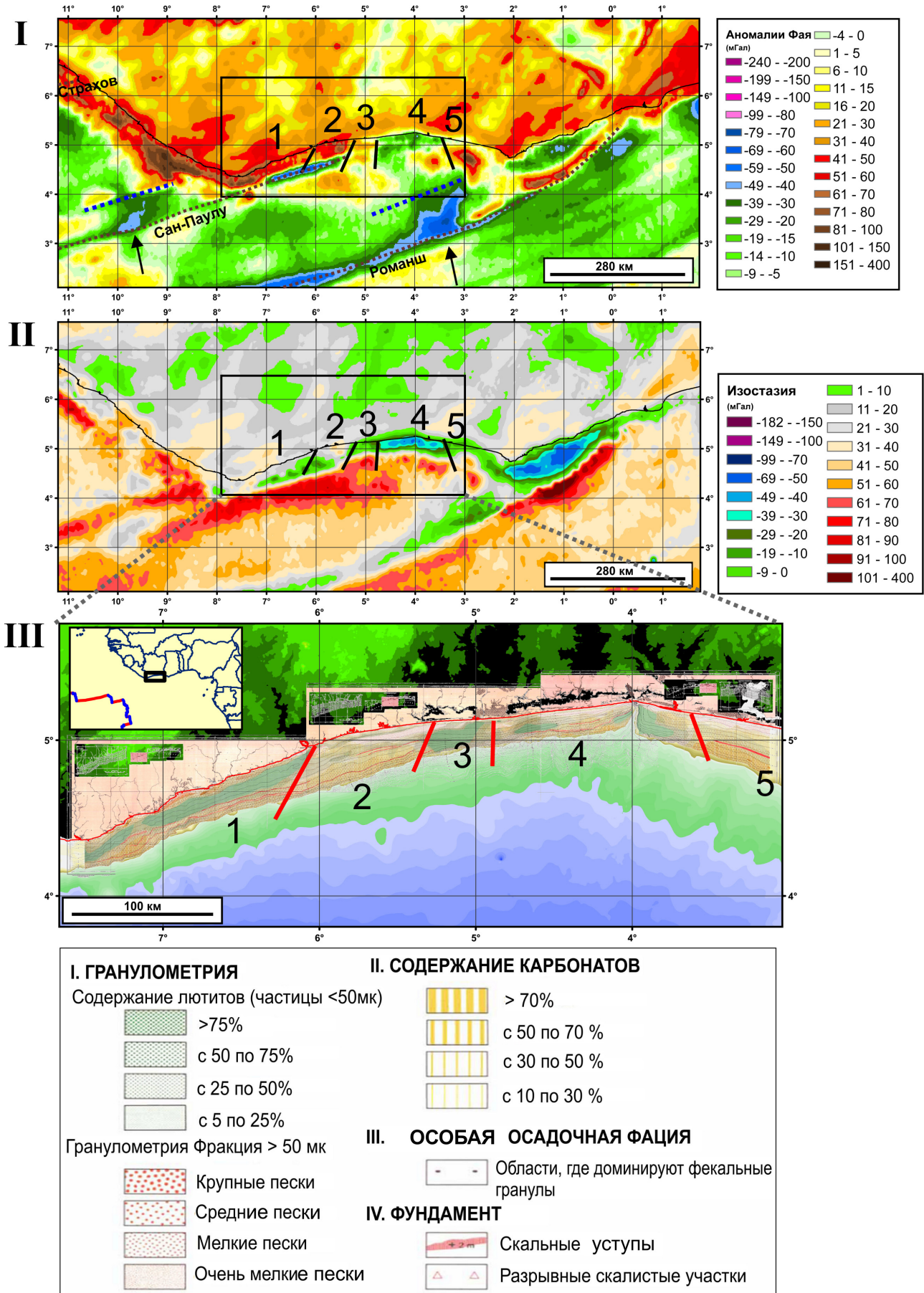
Каньон Тру-Сан-Фон по данным (Vanney, Mascle, 1992) (рис. 5) пересекает континентальный склон осадочного бассейна Кот д'Ивуар от области смены ориентации береговой линии и является одной из основных морфологических особенностей рельефа дна акватории региона. Каньон начинается на краю побережья и формирует врез в континентальный склон, где его ширина достигает около 22 км. Далее русло потока продолжается в абиссальную котловину Гвинейского залива до глубин ~ 5000 м на расстояние ~ 200 км. В настоящее время Тру-Сан-Фон не является продолжением какой-либо наземной реки. Его верхняя часть образована основной ветвью с направлением ССВ-ЮЮЗ и меньшей ветвью с направлением СЗ-ЮВ. Обе ветви соединяются, образуя единую долину, которая глубоко врезана в континентальный шельф. Возраст каньона Тру-Сан-Фон точно не определен. Его верхняя узкая часть сформирована в миоцене. Нижняя часть гораздо шире, чем верхняя. Поэтому возможно, что до миоцена существовал каньон гораздо большего размера, чем нынешний. По данным (Dietz, Knebel, 1971) формирование каньона началось одновременно с расколом Африки и Южной Америки.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Группирующиеся в линейные кластеры северо-восточной ориентации эпицентры на суше Кот д'Ивуар отражают современные движения по смещениям оперения пассивных частей разлома Романш и Сан-Паулу. Сейсмичность южной Ганы также вызвана реактивацией древних региональных разломов в мощной континентальной коре. Формирование осадочных бассейнов Кот-д'Ивуара и Ганы и раскрытие Срединно-Атлантического хребта и океана

Рис. 4. Компиляция данных гравитационных аномалий, их редукции, гранулометрии и составу донных осадков шельфа Кот д'Ивуара. Черными (I и II) и красными (III) линиями показана сегментация шельфа по геофизическим полям и донному опробованию. Цифрами обозначены условные номера блоков, выделяемых по геофизическим полям: I — аномалии силы тяжести в свободном воздухе по данным (Sandwell, Smith, 2009). Стрелки указывают на депрессии типа пулл-апарт. Коричневый пунктир — пассивные части трансформных разломов Страхова, Сан-Паулу и Романш. Синий пунктир — межразломные линеаменты. II — изостатические аномалии по данным (Balmino et al., 2012). III — гранулометрия и состав донных осадков шельфа Кот д'Ивуар по (Martin, 1973).

Fig. 4. Compilation of gravity anomaly data, their reduction, granulometry and bottom sediment composition of Côte d'Ivoire shelf. Black lines (I and II) and red lines (III) show segmentation of the shelf by geophysical fields and bottom sampling. Numbers indicate the conventional numbers of shelf blocks distinguished by geophysical fields. I — free air gravity anomalies (Faya) according to (Sandwell, Smith, 2009). Arrows point to pull-apart type depressions. Brown dotted line — passive parts of the Strakhov, San-Paulu and Romanche transform faults. Blue dotted line are intrafault lineaments. II — isostatic anomalies after (Balmino et al., 2012). III — granulometry and composition of bottom sediments of the Côte d'Ivoire shelf according to (Martin, 1973).



началось в меловое время и было связано с тектоническими процессами вдоль континентальной окраины особого трансформного типа (Nemčok et al., 2016). Выделяют несколько сейсмогенных регионов, связанных с реактивацией разломов в зоне сочленения разломов Романш и Сан-Паулу (рис. 2) (Kutu, 2013). Отметим, что сейсмическая активность вдоль зон трансформных разломов за последнее столетие значительно ослабла (Mbossi et al., 2021), но она имеет место в настоящее время вдоль указанных разломных систем (рис. 2). Полученное пространственное распределение сейсмичности указывает на единую систему разрывных нарушений, в которой происходит тремор различной интенсивности, связанный с вариацией геодинамических параметров, и в которой океаническая часть имеет геометрию, унаследованную от дорифтовой конфигурации в будущих континентальных окраинах трансформного типа (Antobreh et al., 2009; Heine et al., 2013).

Совпадение экстремумов сейсмичности и вариаций силы тяжести во времени указывает на прямое влияние глубинной геодинамики, вызывающей локальные изменения в плотностной структуре недр (Лыгин и др., 2019), на разрядку накопленных напряжений даже в районе, не содержащем главные виды геодинамически активных структур типа рифта или зоны субдукции. Два экстремума сейсмичности 2011 и 2019 гг. с увеличенной магнитудой и частотой событий вряд ли являются следствием воздействия солнечного цикла, поскольку последний не объясняет образование локальных, неравномерно распределенных в пространстве вариаций плотности в литосфере. Значительный вклад годовых вариаций силы тяжести, скорее всего, указывает на влияние процессов вращения сфероида, которые также могут иметь нетривиальный многолетний временной ход, отличающийся от простых годовых вариаций (рис. 3, позиция II). Влияние на него может оказывать вариация перемещения внутреннего твердого ядра Земли в жидком с периодом ~8.5 лет (An et al., 2023). Сложная эволюция в системе Солнце–Луна–Земля (и твердое ядро Земли в жидком) может формировать подобные временные вариации не только плотности, но и изменения широт (Авсюк, Суворова, 2006). Факт накопления напряжений вне активных межплитных границ с их последующей разрядкой указывает на блоковое и расслоенное строение литосферы с возможностью дифференцированного воздействия на ее домены объемных сил геодинамики.

Сопоставление временной эволюции сейсмичности района исследований с вариациями силы тяжести по данным GRACE и их выборочным пространственным распределением

для моментов локальных минимумов и максимумов анализируемых параметров (рис. 3, позиции I–III), по нашему мнению, показывает следующее. Экстремумы вариаций силы тяжести синхронизированы во времени с увеличением магнитуды и частоты сейсмических событий. Рациональным является предположение, что причинно-следственная связь между этими процессами направлена от вариаций силы тяжести к сейсмичности. Другими словами, вариация силы тяжести инициирует разрядку напряжений. Тот факт, что максимальное проявление вариаций силы тяжести со сменой полярности отклонений между весной и осенью сосредоточено в приэкваториальной зоне, указывает на влияние фактора вращения сфероида Земли, при котором наибольшие центробежные ускорения и их вариации при изменении угловой скорости вращения (IERS, 2008) имеют место именно здесь. Вариации в районах, расположенных ближе к полярным областям также имеют место, но не имеют столь контрастной выраженности, как около экватора.

Еще одной особенностью пространственного распределения вариаций силы тяжести вдоль экватора является появление ее контрастных аномалий разного знака (рис. 3, позиция III) в периоды роста сейсмической активности. Если вариации параметров вращения Земли, связанные с геодинамикой ядра, при наличии исходных плотностных неоднородностей в литосфере порождают усиление (или ослабление) силы тяжести между ее доменами, то формирующаяся в них вариация силы тяжести с переменной во времени полярностью является фактором, который способен инициировать разрядку существующих напряжений между блоками литосферы. Естественными их разделителями являются (рис. 1, 2): разломы оперения трансформных океанских смещений, переходная зона океан-континент, области смены кривизны и простирания разломов. Отдельно стоит вопрос о механизме возникновения этих напряжений. Его решение может находиться в области независимых горизонтальных движений указанных блоков литосферы с характеристиками, имеющими неодинаковые значения в пределах плиты, но оно не является задачей настоящей работы.

Распределение аномалий силы тяжести в свободном воздухе и изостатической аномалии в совокупности со структурой донных осадков (рис. 4, позиции I–III) показывает следующее. Типичный для окраин, представленных древними континентальными образованиями, краевой максимум в Западной Африке прерывается в районе мезо-кайнозойских осадочных бассейнов (рис. 1). Это закладывает основу для изучения природы вариаций гравитационного поля в

пространстве, которые отличают его от стандартного представления. Сегментации аномалий силы тяжести в свободном воздухе и изостазии вдоль шельфа совпадают (рис. 4, позиции I, II). Это может быть интерпретировано, как воздействие дифференцированных в пространстве вертикальных движений, происходящих из-за разной нагрузки масс коры над компенсационной поверхностью. Отметим что в изостазии выделяются относительные минимумы (рис. 4, позиция II) в сегментах 1, 3 и 4, и максимумы в сегментах 2 и 5.

Избыток масс над компенсационной поверхностью (положительные аномалии) закладывает тенденцию к опусканию блока, а недостаток (отрицательные аномалии) — к его всплытию. Данный подход верен только тогда, когда действие, сформировавшее избыток или недостаток масс закончено, и сложившееся соотношение масс регулирует вертикальную адаптацию блока коры на вязком субстрате. Если действие выведения блока из плавучего равновесия не закончено, то, к примеру, положительная аномалия изостазии не означает, что блок проседает. Он может продолжать подъем, сопровождающийся ростом изостатических значений над компенсационной поверхностью, за счет латеральных компонент движения блоков плит, но после прекращения их действия просядет с вертикальным перемещением отрицательного знака.

Отсутствие в изостатических аномалиях (рис. 4, позиция II) депрессий типа пулл-апарт (рис. 4, позиция I) означает что они в целом скомпенсированы. Эти депрессии примыкают к разломам Сан-Паулу и Романш и с севера в межразломном пространстве ограничены дополнительными линеаментами, которые не являются продолжением известных трансформных разломов, выделяемых в районе Срединно-Атлантического хребта и трассируемых до Африканской континентальной окраины (рис. 1). Это указывает на то, что в условиях изгиба пассивных частей разломов и активизации сдвиговых смещений вдоль них, приводящих к заложению пулл-апарт депрессий, может иметь место дополнительная деламинация в межразломных блоках, аналогичная межразломному пространству к югу от уступа Кабо-Верде (рис. 1) (Соколов, 2018), и появления новых разломных трогов, ограничивающих эти депрессии с севера.

Сегментам 2 и 5 на карте донных осадков (рис. 4, позиция III) соответствуют области с более крупнозернистым гранулометрическим составом, имеющие такое же положение разделителей сегментов, как на карте изостазии сегменты с теми же номерами (рис. 4, позиция II). Это может интерпретироваться следующим образом. Сегменты 2 и 5 с положительными изостати-

ческими аномалиями испытывают в настоящее время вертикальные движения положительного знака и в условиях действия сильного Гвинейского течения с запада на восток (Атлас..., 1977) а также приливных течений формируют прибрежные гряды, банки или валы, покрытые грубообломочным материалом и песчаной фракцией за счет вымывания более мелкой фракции. Сегмент 2 со структурой роста соответствует локальному кластеру сейсмичности (рис. 3), а сегмент 5 также отличается сейсмической активностью, но с меньшей интенсивностью. Сегменты 1 и 3 отличаются повышенным содержанием тонкой фракции и они либо подвержены вертикальным движениям отрицательного знака, либо зафиксированы по уровню относительно сегментов 2 и 5. Наиболее разнородным материалом донных осадков представлен сегмент 4, в котором наблюдается минимум изостазии. Тот факт, что в его центральной части наблюдается интервал с грубообломочным материалом, указывает на возможность инверсии внутри осадочного бассейна Кот д'Ивуар при общем отрицательном изостатическом фоне. На вертикальный подъем сегментов 2 и 5, их обрамления и центрального интервала в сегменте 4, также указывает наличие обнажений магматических пород (скальных выступов) по данным (Martin, 1973) (рис. 4, позиция III).

По данным (Vanneu, Mascle, 1992) (рис. 5) каньон Тру-Сан-Фон пересекает континентальный склон в области трансгрессионного изменения положения береговой линии. Этот факт находится в хорошем согласии с данными изостазии и гранулометрии донных осадков (рис. 4, позиция III), по которым данный участок шельфа должен испытывать погружение, приводящее к смещению береговой линии вглубь континента. Однако по данным о положении береговой линии до 1950 г. (рис. 5) этот процесс может в настоящий момент претерпевать переход к регрессии.

Тектонические и геофизические элементы-индикаторы, рассмотренные в данном исследовании, сведены в общую схему (рис. 6). Она иллюстрирует проявления неотектоники в трех связанных между собой зонах: океанической, переходной и континентальной. Океаническая зона представлена сейсмичностью в пассивных частях трансформных разломов и признаками правосдвиговых смещений с формированием депрессий типа пулл-апарт и появлением дополнительных межразломных трогов. Переходная зона представлена разворотом оперяющих трансформы нарушений к северо-востоку, увеличением интенсивности и частоты сейсмических событий и формированием между областями сочленения разломов с континентом чередующихся блоков коры с разнонаправленными вертикальными движениями. Указанные

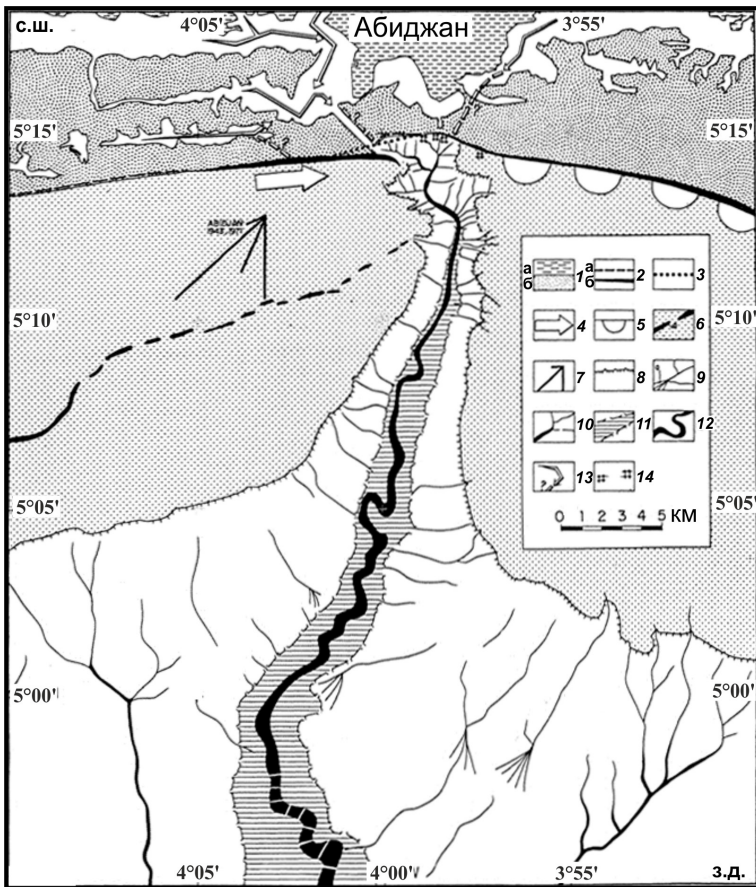


Рис. 5. Каньон Тру-Сан-Фон по данным (Vanney, Mascle, 1992). 1 – приливные болота (а) и прибрежные гряды (б); 2 – изменения береговой линии: (а) регрессия и (б) трансгрессия; 3 – изменения береговой линии до 1950 г.; 4 – преобладающий прибрежный дрейф; 5 – отбойные течения или слабый дрейф на запад; 6 – континентальный шельф; 7 – господствующие ветры в Абиджане; 8 – бровка шельфа; 9 – боковые врезы; 10 – склоновый каньон; 11 – днище трога; 12 – русло потока; 13 – протоки Лагуны; 14 – разрушенные причалы.

Fig. 5. Trou Sans Fond Canyon after (Vanney, Mascle, 1992). 1 – tidal marshes (a) and coastal ridges (b); 2 – shoreline changes: (a) regression and (b) transgression; 3 – shoreline changes before 1950; 4 – prevailing coastal drift; 5 – rip currents or weak westward drift; 6 – continental shelf; 7 – prevailing winds in Abidjan; 8 – shelf edge; 9 – lateral incisions; 10 – slope canyon; 11 – trough bottom; 12 – stream channel; 13 – Lagoon channels; 14 – destroyed berths.

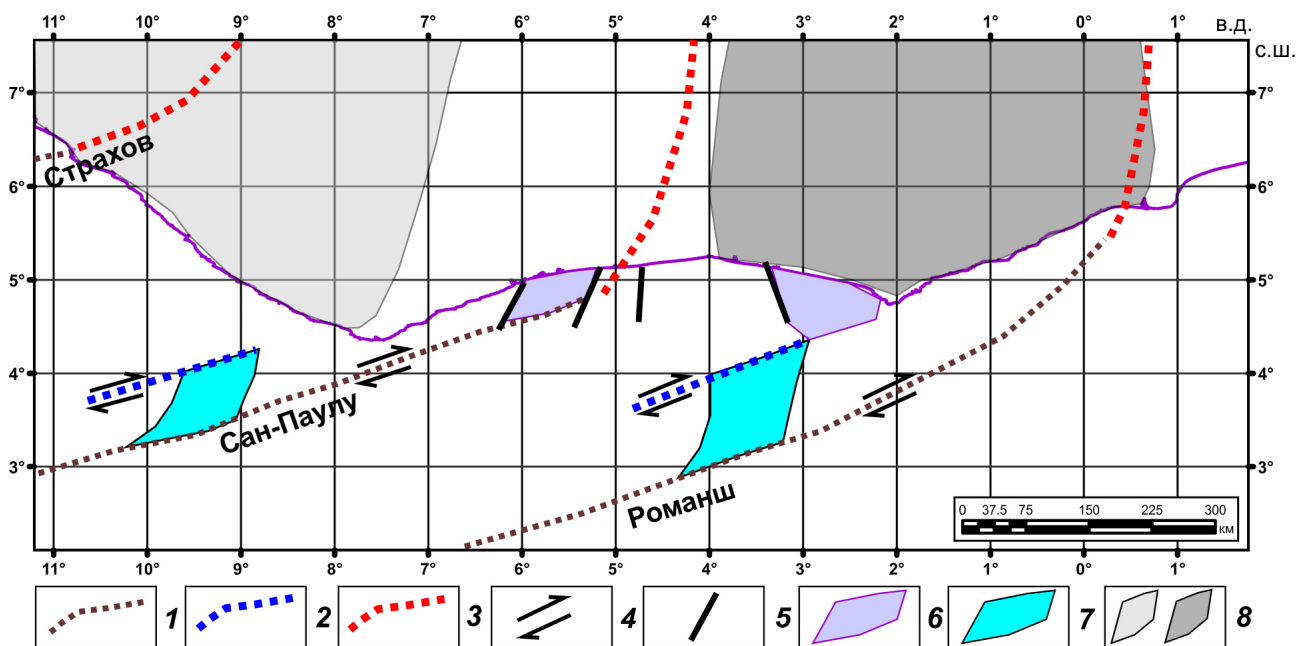


Рис. 6. Схема тектонических и геофизических индикаторов неотектонической активности в районе шельфа Кот д'Ивуара. 1 – пассивные части океанских трансформных разломов; 2 – межразломный трог; 3 – ось интенсивной сейсмичности вдоль оперяющих нарушений; 4 – правый сдвиг; 5 – границы сегментов гравитационного поля на шельфе; 6 – области максимумов изостазии; 7 – депрессии типа пулл-апарт; 8 – области отрицательных (светло-серый) и положительных (темно-серый) вариаций силы тяжести.

Fig. 6. Scheme of tectonic and geophysical indicators of neotectonic activity in the Ivory Coast shelf area. 1 – passive parts of oceanic transform faults; 2 – intrafault trough; 3 – axis of intense seismicity along the splay faults; 4 – right-lateral strike-slip fault; 5 – boundaries of the gravity field segments on the shelf; 6 – areas of isostatic maxima; 7 – pull-apart depressions; 8 – areas of negative (light gray) and positive (dark gray) variations of gravity.

особенности в совокупности с переменным во времени гравитационным полем в континентальной зоне, контролирующем сейсмичность, образуют взаимосвязанную систему, неотектонические процессы в которой усилены за счет их экваториального положения.

ВЫВОДЫ

Пространственное распределение сейсмичности в районе континентальной окраины Кот д'Ивуар представлено плотными кластерами событий в районах сочленения океанских трансформных разломов Сан-Паулу и Романш с континентом и их сухопутного продолжения, имеющего форму оперения при правосдвиговом смещении, проходящего по древним структурам, реактивированным в настоящее время. Распределение сейсмичности указывает на единую систему разрывных нарушений, в которой происходит тремор различной интенсивности, связанный с вариацией геодинамических параметров и азимутов простирания разломов, и в которой океаническая часть с окраиной трансформного типа имеет унаследованную геометрию от дорифтовой стадии.

Совпадение во времени экстремумов сейсмичности и вариаций силы тяжести континентальной окраины Кот д'Ивуар указывает на связь глубинных изменений плотностной структуры с разрядкой накопленных напряжений в районе без типичных геодинамически активных структур. Наиболее вероятной причиной, по нашему мнению, объясняющей связь сейсмичности с вариациями силы тяжести, является влияние процессов вращения сфероида Земли. Накопление напряжений на пассивной континентальной межплитной границе с их последующей разрядкой указывает на дифференцированное воздействие объемных сил на литосферные блоки.

Сопоставление локальных минимумов и максимумов для временной эволюции сейсмичности района исследований континентальной окраины Кот д'Ивуар с вариациями силы тяжести и их выборочным пространственным распределением показывает, что в периоды интенсивной сейсмичности имеет место появление контрастных вариаций силы тяжести между блоками внутри литосферной плиты в экваториальной аномальной зоне.

Краевой шельфовый максимум аномалий в свободном воздухе в Западной Африке прерывается в районе мезо-кайнозойского осадочного бассейна Кот д'Ивуар. Аномалии в свободном воздухе в свободном воздухе и изостазии вдоль шельфа сегментируются одинаково за счет воздействия дифференцированных в пространстве

вертикальных движений. Депрессии типа пулл-апарт около пассивных частей трансформных разломов в изостатических аномалиях скомпенсированы и указывают на дополнительные деформации фундамента в межразломных блоках и активацию сдвиговых смещений правой кинематики около изгиба пассивных частей разломов к северо-востоку.

Сегментам 2 и 5 (рис. 4) соответствуют области с более крупнозернистым гранулометрическим составом и положительными аномалиями изостазии, что указывает на их положительные вертикальные движения и вымывание тонкой осадочной фракции из донного материала. Этим сегментам также соответствуют локальные кластеры сейсмичности. Сегменты 1 и 3 с повышенным содержанием тонкой фракции и отрицательными аномалиями изостазии либо погружаются, либо стагнируют относительно сегментов 2 и 5, испытывающих подъем. Сегмент 4, в котором наблюдается минимум изостазии и отдельный интервал с грубообломочным материалом, вероятнее всего испытывает инверсию внутри осадочного бассейна Кот д'Ивуар. На вертикальный подъем сегментов 2 и 5, их обрамления и центрального интервала в сегменте 4, также указывает наличие обнажений магматических пород.

Тектонические и геофизические элементы-индикаторы представлены в трех взаимодействующих между собой зонах: океанической, переходной и континентальной. В совокупности с переменным во времени гравитационным полем они образуют взаимосвязанную систему, неотектонические процессы в которой усилены за счет их экваториального положения.

Благодарности. Авторы выражают глубокую признательность Николаю Петровичу Чамову за ценные советы по содержанию работы.

Финансирование. Исследование выполнено в рамках темы государственного задания ГИН РАН ФММГ-2023-0005 «Влияние глубинного строения мантии на тектонику, морфологию структур дна и опасные геологические процессы в глубоководных и шельфовых акваториях Мирового океана».

Список литературы [References]

- Авсюк Ю.Н., Суворова И.И.* Процесс изменения широт и его связь с вынужденными перемещениями внутреннего твердого ядра // *Физика Земли*. 2006. № 7. С. 66–75 [*Avsyuk Yu.N., Suvorova I.I.* Latitude Variations And Their Relation To Forced Movements Of The Inner Solid Core // *Izvestiya, Physics Of The Solid Earth*. 2006. V. 42. № 7. P. 598–607 (in Russian)]. Атлас океанов. Атлантический и Индийский океаны. Отв. редактор С.Г. Горшков. Л.: ГУНиО МО СССР. 1977 г. 306 с. [Atlas of the Oceans. Atlantic and Indian

- Oceans. Ed. S.G. Gorshkov. Leningrad: GUNiO MO USSR. 1977. 306 p.].
- Лыгин И.В., Ткаченко Н.С., Зотов Л.В.* Анализ временных вариаций гравитационного поля над северо-восточным сектором Тихоокеанского региона по данным спутниковой миссии Грейс // Геофизика. 2019. № 2. С. 73–82 [Lygin I.V., Tkachenko N.S., Zotov L.V. Analysis of the gravity variations above the north-eastern part of Pacific Ocean region by the GRACE satellite mission // Geophysica. 2019. № 2. P. 73–82 (in Russian)].
- Соколов С.Ю.* Тектоника и геодинамика Экваториального сегмента Атлантики. (Труды ГИН РАН: вып. 618) М.: Научный мир, 2018. 269 с. [Sokolov S.Yu. Tectonics and Geodynamics of the Atlantic Equatorial Segment. (Transactions of GIN RAS: issue 618) Moscow: Scientific World, 2018. 269 p. (in Russian)].
- An L.J., Sammis C.G.* Development of strike-slip faults: shear experiments in granular materials and clay using a new technique // Journal of Structural Geology. 1996. V.18 (8). P. 1061–1077. [https://doi.org/10.1016/0191-8141\(96\)00012-0](https://doi.org/10.1016/0191-8141(96)00012-0)
- An Y., Ding H., Chen Z., Shen W. Jiang W.* Inner core static tilt inferred from intradecadal oscillation in the Earth's rotation // Nature Communications. 2023. 14:8130. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-43894-9>
- Antobreh A., Faleide J.I., Tsikalas F., Planke S.* Rift-shear architecture and tectonic development of the Ghana margin deduced from multichannel seismic reflection and potential field data // Marine and Petroleum Geology. 2009. V.26. P.345–368. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2008.04.005>
- Balmino G., Vales N., Bonvalot S., Briais A.* Spherical harmonic modeling to ultra-high degree of Bouguer and isostatic anomalies // Journal Geodesy. 2012. V. 86. P. 499–520. <https://doi.org/10.1007/s00190-011-0533-4>
- Blarez E.* La marge continentale de Côte-d'Ivoire-Ghana. Structure et évolution d'une marge continentale transformante // Thèse doct. Univ. Paris. 1986. 188 p.
- Dietz R.S., Knebel H.J.* Trou-Sans-Fond submarine canyon, Ivory-Coast, Africa // Deep-sea Reseach. 1971. V. 18. № 4. P. 441–447.
- GEBCO 30» Bathymetry Grid. Version 20141103. 2014. (<http://www.gebco.net>).
- Gorini M.A.* The tectonic fabric of the Equatorial Atlantic and adjoining continental margins: Gulf of Guinea to northeastern Brazil // Projecto Remac-Reconhecimento Global da Margemcontinental Brasileira. Asmus H.E. (ed.). Petrobras. 1981. P. 11–116.
- GPS Time Series Data. 2022. Jet Propulsion Laboratory of California Institute of Technology. <https://sideshow.jpl.nasa.gov/post/series.html>
- IERS Annual Report 2006. Edited by Dick W.R. and Richter B. International Earth Rotation and Reference Systems Service, Central Bureau. Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2008. 187 p.
- ISC Bulletin: event catalogue search. 2023. (Выборка 2023.01.28). <http://www.isc.ac.uk/iscbulletin/search/catalogue/> (<https://doi.org/10.31905/D808B830>).
- Hagglauer-Ruppel B.* Kinematik und Begleitstrukturen von Scherzonen: Experimente und Beispiele Mitteleuropas (mit besonderer Berücksichtigung des OsningLineamentes). Ph.D. thesis. Ruhr-University of Bochum. Germany. 1991.
- Heine C., Zoethout J., Muller R.D.* Kinematics of the South Atlantic rift // Solid Earth. 2013. V. 4. P. 215–253. <https://doi.org/10.5194/se-4-215-2013>
- Kouame L.N., Coulibaly L., Kouadio G.R.N. et al.* Utilisation de la sismique reflexion pour l'étude tectonique de la marge d'abidjan (Cote D'Ivoire): décrochement et extension // International Journal of Development Research. 2018. V. 8. № 9. P. 22883–22891.
- Kutu J.M.* Seismic and Tectonic Correspondence of Major Earthquake Regions in Southern Ghana with Mid-Atlantic Transform-Fracture Zones // International Journal of Geosciences. 2013. V. 04. P. 1326–1332.
- Landerer F.W.* TELLUS_GRAC_L3_CSR_RL06_LND_v04. Ver. RL06 v04. 2021. PO.DAAC, CA, USA. Dataset accessed [2023-01-28]. <https://doi.org/10.5067/TELND-3AC64>
- Landerer F.W., Swenson S.C.* Accuracy of scaled GRACE terrestrial water storage estimates // Water Resources Research. 2012. V. 48. W04531. 11 p. <https://doi.org/10.1029/2011WR011453>
- Martin L.* La sédimentation actuelle sur le plateau continental de Côte-d'Ivoire // Cah. ORS-TOM. Sér. Géol. 1973. M.5 (2): P. 155–167.
- Mbossi E.F., Ndibi D.D.E., Nguet P.W. et al.* Preliminary Seismic Hazard Assessment in West Africa Based on Incomplete Seismic Catalogs // Open Journal of Earthquake Research. 2021. V.10. № 2. P. 75–93. <https://doi.org/10.4236/ojer.2021.102006>
- Nemčok M., Rybár S., Sinha S.T. et al.* Transform margins: development, controls and petroleum systems – an introduction // Transform Margins: Development, Controls and Petroleum Systems. Geological Society, London. 2016. Special Publications. 431. P. 1–38.
- Nkodia H.M.D.-V., Miyouna T., Kolawole F. et al.* Seismogenic fault reactivation in western Central Africa: Insights from regional stress analysis // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2022. V. 23. e2022GC010377. <https://doi.org/10.1029/2022GC010377>
- Sandwell D.T., Smith W.H.F.* Global marine gravity from retracked Geosat and ERS-1 altimetry: Ridge segmentation versus spreading rate // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2009. V. 114. № B1. P. 1–18. <https://doi.org/10.1029/2008JB006008>
- Sombo B.C.* Etude de l'évolution structurale et sismo-stratigraphique du bassin sédimentaire offshore de Côte d'Ivoire, marge passive entaillée d'un canyon // Thèse de Doctorat d'Etat Sc. De la Terre. Univ d'Abidjan (Côte d'Ivoire). 2002. 304 p.
- Tastet J.P.* Environnements sédimentaires et structuraux quaternaires du littoral du Golfe de Guinée (Côte-d'Ivoire, Togo, Bénin) // Thèse doctorale. État Université. Bordeaux. 1979. 181 p.
- Vanney J.R., Mascle J.* Un canyon sous-marin revisité: le Trou sans fond de Côte d'Ivoire // Annales de Géographie. 1992. V. 101. № 563. P. 43–67.
- Wiese D.N., Yuan D.-N., Boening C. et al.* JPL GRACE and GRACE-FO Mascon Ocean, Ice, and Hydrology Equivalent Water Height CRI Filtered. Ver. RL06.1Mv03. 2023. PO.DAAC, CA, USA. Dataset accessed [2023-01-28]. <https://doi.org/10.5067/TEMSC-3JC63>

**NEOTECTONICS OF THE OCEAN-CONTINENT TRANSITION ZONE
IN THE CÔTE D'IVOIRE REGION (WEST AFRICA)**

S.Yu. Sokolov¹, Diomande Mamadu², Eby Ama Yvonne Ednard³, Mouah Raymond⁴

¹*Geological Institute RAS, Moscow, Russia, 119017*

²*RUDN University, Moscow, Russia, 117198*

³*National Company of Petroleum Operations of Cote d'Ivoire (PETROCI), Abidjan, Cote d'Ivoire, 8XHG+4M*

⁴*Panafrican Energy Services, Abidjan, Cote d'Ivoire, 924M+WJ*

Received December 15, 2023; revised April 13, 2024; accepted June 25, 2024

Structural and geophysical indicators of neotectonics in the area of the continental margin of Côte d'Ivoire are represented in three interacting zones: oceanic, continental and transitional. Together with the time-varying gravitational field, they form a system in which neotectonic processes are enhanced due to their equatorial position. Seismicity is represented by dense clusters of events in the areas of junction of the Strakhov, Sao Paulo and Romansh oceanic transform faults with the continent and their overland continuation. Seismicity and gravity variations show the relationship of deep density changes to stress discharge in the area and the effect of volumetric forces on lithospheric blocks. Free air and isostasy anomalies along the shelf are segmented by the effects of vertical motions. Pull-apart depressions near the passive parts of transform faults indicate basement deformations in the interfault blocks and activation of shear displacements of dextral kinematics near the bend of the passive parts of the faults to the northeast from main oceanic azimuth. Segments with isostasy maxima on the shelf correspond to areas with coarser grain size granulometric composition, indicating leaching of fine sedimentary fraction from the bottom material.

Keywords: Côte d'Ivoire, neotectonics, seismicity, gravity variations, sediments granulometry.