

**ИЗУЧЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ РЕАКТИВАЦИИ РАЗЛОМОВ В ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ  
ЮЖНО-КИТАЙСКОГО МОРЯ КАК ИСТОЧНИКА ОПАСНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ  
ПРОЦЕССОВ**

**Чан Туан Зунг<sup>1,2</sup>, Р.Г. Кулинич<sup>3</sup>, Нгуен Куанг Минь<sup>1,4</sup>, Нгуен Ван Санг<sup>5</sup>, Чан Туан Зуонг<sup>1</sup>,  
Нгуен Чунг Тань<sup>1</sup>, Нгуен Ба Дай<sup>1</sup>, Чан Чонг Лан<sup>1</sup>, Нгуен Ким Зунг<sup>1</sup>, Данг Суан Тунг<sup>6</sup>,  
Дао Динь Чам<sup>7</sup>, Нгуен Тай Сон<sup>7</sup>**

<sup>1</sup>Институт морской геологии и геофизики, Вьетнамская Академия наук и технологий, Ханой, Вьетнам,  
e-mail: trantuandung@yahoo.com

<sup>2</sup>Университет наук и технологий, Вьетнамская Академия наук и технологий, Ханой, Вьетнам,  
e-mail: trantuandung@yahoo.com

<sup>3</sup>ФГБУН Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева, ДВО РАН, ул. Балтийская 43,  
г. Владивосток, 690041; e-mail: rkulinich@mail.ru

<sup>4</sup>Отдел наук о Земле, Центральный национальный университет, Тайвань,  
e-mail: quangminh.nguyen2114@gmail.com

<sup>5</sup>Ханойский университет геологии и добычи полезных ископаемых, Ханой, Вьетнам,  
e-mail: nguyenvansangtd40@gmail.com

<sup>6</sup>Институт геологических наук, Вьетнамская Академия наук и технологий, Ханой, Вьетнам,  
e-mail: Dangxuantung0893@gmail.com

<sup>7</sup>Институт географии, Вьетнамская Академия наук и технологий, Ханой, Вьетнам, e-mail: chamvdl@gmail.com

Поступила в редакцию 24 апреля 2021 г.

В статье обобщаются результаты исследований, в задачу которых входило изучение возможности реактивации системы разломов в земной коре Южно-Китайского моря с вероятными неблагоприятными последствиями для прибрежных районов Вьетнама. Работа выполнялась в течение нескольких лет с публикацией промежуточных результатов. Решение указанной задачи потребовало определения регионального поля напряжений в земной коре. Для этого был использован анализ механизмов очагов местных землетрясений, а также структурных характеристик разломов, полученных по гравиметрическим данным с использованием результатов сейсмических исследований. Возможность возобновления активности разломов определена методом обратных напряжений в рассчитанном региональном поле напряжений. Параметры поля напряжений использованы для оценки необходимой силы скольжения вдоль разломов. Для оценки вероятности реактивации всей системы разломов была рассчитана возможность горизонтальных и вертикальных структурных (блоковых) перемещений в земной коре изучаемого региона. На основе всестороннего анализа полученных данных сделан прогноз вероятности реактивации системы разломов в регионе Южно-Китайского моря. Это может быть причиной землетрясений, подводных оползней и других опасных природных процессов в прибрежных районах Вьетнама.

**Ключевые слова:** система разломов, механизмы очагов землетрясений, региональное поле напряжений, гравиметрические и сейсмические данные, прогноз вероятности реактивации разломов, Южно-Китайское море.

**ВВЕДЕНИЕ**

Одним из источников опасных природных процессов, происходящих на морском дне (землетрясения, оползни и т.д.), является активизация (реактива-

ция) тектонических разломов в земной коре. Возобновление тектонической активности возможно под воздействием регионального поля геодинамических напряжений и благоприятных структурных характе-

ристик разломов (местоположение, азимут простирания, угол падения, глубина проникновения и т.п.). В связи с этим становится важным всестороннее изучение системы разломов в регионах с активной геодинамикой, к которым относится и Южно-Китайское море (ЮКМ) [1–10, 24, 42, 43].

Целью выполненной работы было изучение возможности такой тектонической реактивации. Работа выполнялась в течение нескольких лет. Детальное описание использованных данных, методов их обработки и интерпретации, а также промежуточные результаты представлены в публикациях [53–57]. В настоящей статье излагаются результаты обобщенного анализа ранее выполненных работ с необходимыми ссылками.

Для реализации указанной цели выполнен расчет регионального поля напряжений с использованием кинематических данных, полученных в результате анализа механизма очагов местных землетрясений, и применением метода обратных напряжений. Кроме этого, была сделана оценка потенциальной предрасположенности разломов к сдвиговым дислокациям. Для этого была использована теория скольжения по разломам.

Эта теория была предложена Уоллесом [59] и Боттом [15]. Её реализация ограничивается следующими основными условиями: (1) разломы являются плоскими и бесконечными; (2) смещение по разломам небольшое; (3) блоки, ограниченные разломами, жесткие, вращение блоков не происходит; (4) смещение вдоль разлома не зависит от смещения вдоль других разломов; (5) только одно однородное поле напряжений должно быть ответственным за смещения.

Позднее был проведен ряд исследований, основанных на гипотезе Уоллеса-Ботта, с использованием метода обратных напряжений [11, 12, 21, 37]. Исследовались также условия возникновения тенденции скольжения по разломам [32, 60, 62]. Указанными и другими работами экспериментально и количественно была доказана возможность применения гипотезы Уоллеса-Ботта в решении обсуждаемой нами проблемы. В данной работе мы использовали опыт предшествующих исследований. При этом предполагалось, что поле напряжений в земной коре ЮКМ удовлетворяет условиям гипотезы Уоллеса-Ботта, т.е. является единственным и однородным.

На этой основе была рассчитана возможность относительных горизонтальных и вертикальных смещений в земной коре ЮКМ и сделан вывод о возможности реактивации системы разломов в этом регионе.

## ТЕКТОНИЧЕСКАЯ ОБСТАНОВКА

Южно-Китайское море является одним из крупнейших окраинных морей западной части Тихого океана. На западе оно ограничено блоком Индокитая, на востоке микроплитой Филиппинского моря и блоком Янцзы на севере.

Условиям и механизмам формирования ЮКМ, как и других морей Юго-Восточной Азии, посвящено большое количество исследований. Здесь, например, апробирована модель формирования глубоководных котловин как задуговых впадин при субдукционных процессах [31], рассмотрена роль мантийных диапиров в формировании структур земной коры [7] и др.

В 1982 г. Таппонье с соавторами предложил модель происхождения Южно-Китайского моря, в соответствии с которой оно сформировалось как следствие столкновения между Индийской и Евразийской литосферными плитами примерно 55–50 млн лет назад [48]. В результате столкновения Индокитайский блок был выдавлен на юго-восток по разлому р. Красной. Это перемещение и вращение Индокитайского блока по часовой стрелке были интерпретированы как ответственные за раскрытие ЮКМ в этот период. Спустя 20 млн лет после этого события экстрезивная тектоника сместилась в сторону других сдвиговых разломов в Центральной Азии, тем самым прекратив спрединг морского дна в ЮКМ.

Еще одна модель обсуждалась в работах [24, 25]. В ней раскрытие ЮКМ также связывается с коллизией Индийской и Евразийской плит. Автор этой модели выделил три периода в развитии региона, происходивших 45, 25 и 5 млн лет назад. 45 млн лет назад произошла перестройка плит, связанная с коллизией Индии и Азии. Существенная реконструкция границ плит произошла 25 млн лет назад. Тектонические события в то время были обусловлены движением Тихоокеанской плиты. Движения плит и изменения их границ снова начались около 5 млн лет назад, вероятно, в результате изменения движения Тихоокеанской плиты. Субдукция стала основным механизмом тектонической перестройки.

Еще одна модель предполагала существование в эоцене Прото-Южно-Китайского моря, которое начало погружаться под Тихий океан и континентальную кору Борнео [24, 49]. Тяга субдуцирующей плиты, направленная на восток, вызвала растяжение континентальной коры, что в конечном итоге привело к раскрытию ЮКМ в олигоцене–миоцене.

В работах [20, 36, 47] формирование ЮКМ связывается с рифтогенезом, распространившимся в кайнозойскую эру. Сначала, как считают авторы работы

[20], палеогеновый рифтогенез происходил вдоль Вьетнамского континентального шельфа с образованием палеогеновых рифтовых впадин, а затем в неогене рифтогенные процессы привели к образованию моря. Южно-Китайское море начало образовываться 45 млн лет назад в результате раскола южного Китая. Кульминация наступила 30 млн лет назад и завершилась 17 млн лет назад [47]. По мнению [44], Южно-Китайское море образовалось в результате спрединга, продолжавшегося от позднего олигоцена до среднего миоцена. После завершения спрединга сжатие обусловило движение дуги Тайвань-Лусон к северо-западу, и сдвиговые движения распространились на восточные и западные окраины моря.

Альтиметрические исследования показали распространение цепей подводных гор (вероятно современных вулканов) вдоль оси спрединга, связанных, по-видимому, с глубинными разломами. На основе данных об аномальных магнитных полях было показано, что формирование ЮКМ происходило в два этапа в диапазоне от 30 до 16 млн лет [16].

Как уже отмечалось, геодинамические процессы в регионе Южно-Китайского моря продолжают и в настоящее время. Современная геодинамическая активность этого региона обусловлена его расположением между коллизионными плитами Тихого и Индийского океанов, а также Евразии и Австралии, на границах которых процессы конвергенции продолжают и в настоящее время [24]. В пределах Южно-Китайского моря и его обрамления это выражается сейсмической активностью, современным наземным и подводным вулканизмом и непосредственным движением плит, которое фиксируется GPS-наблюдениями. Сейсмичность и вулканическая деятельность наиболее активно проявляются на востоке ЮКМ, в зоне конвергенции с микроплитой Филиппинского моря [38]. Наземный и подводный вулканизм на остальной площади ЮКМ и его непосредственном обрамлении описан в большом количестве работ [1–10, 42, 43]. Результаты GPS-наблюдений представлены в работе [35].

По мнению авторов, все указанные факторы являются основным источником, контролирующим современное поле геодинамических напряжений в этом регионе. Поэтому опасность реактивации существующей здесь системы разломов является вполне вероятной.

## ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ДАННЫЕ

### Землетрясения и сейсмические данные

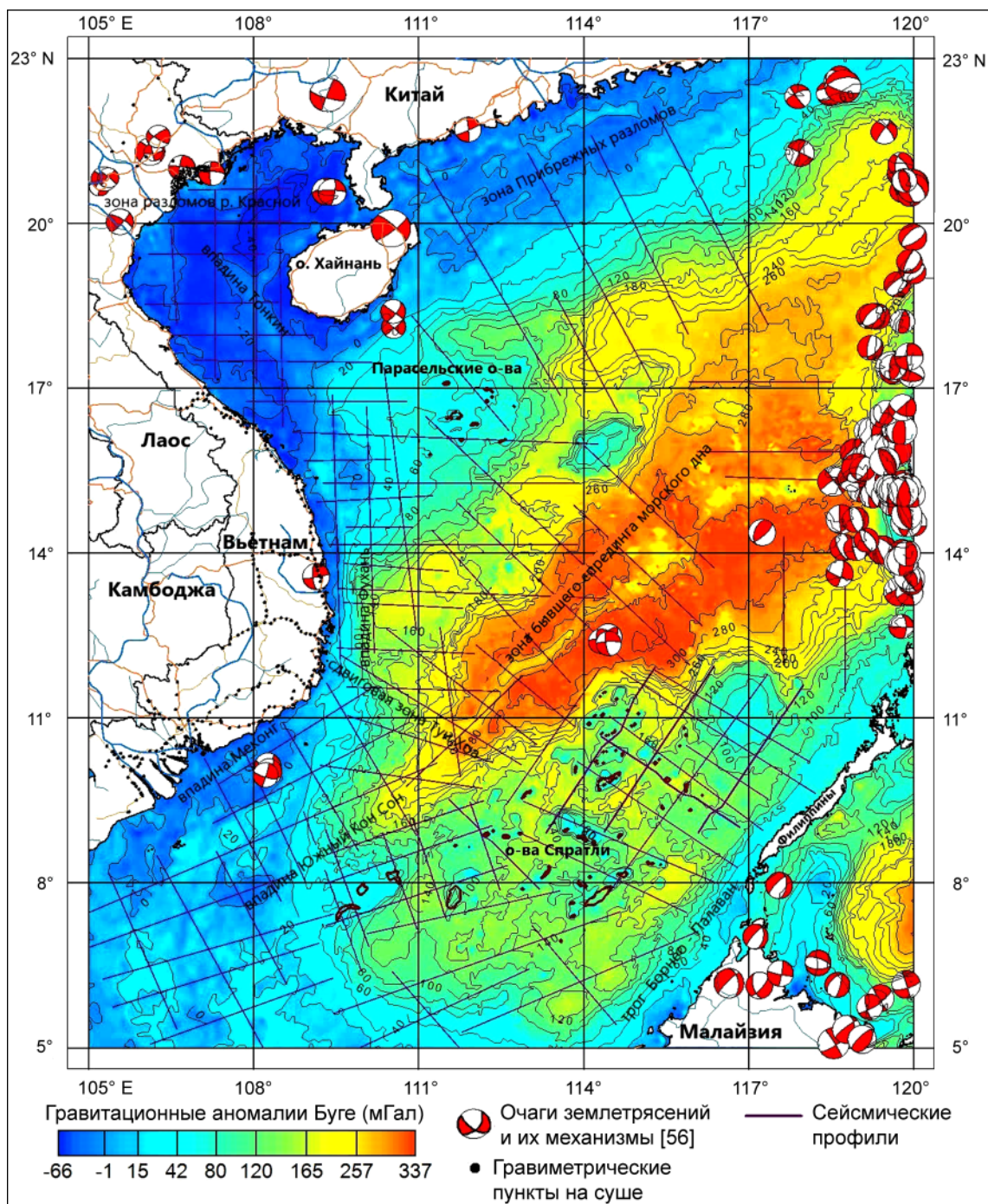
Механизмы очагов землетрясений (МОЗ) представляют надежный источник информации о полях

напряжений в земной коре на глубинах, превышающих возможности бурения. Для Южно-Китайского моря, где максимальная глубина разведочных скважин не превышает 5 км, необходимую информацию свыше этих глубин можно получить, используя только механизмы очагов землетрясений [50, 51]. В связи с этим данные о механизмах очагов землетрясений стали основным источником информации для расчета регионального поля напряжений. Для этого предварительно была собрана необходимая информация о землетрясениях, которые были зарегистрированы в регионе за период более 100 лет [13, 18, 27, 28, 33, 34].

Как было отмечено, большинство землетрясений располагается на восточной периферии рассматриваемого региона, преимущественно в зоне конвергенции с микроплитой Филиппинского моря. Активизация существующих здесь разломов может произойти не за счет внутриплитного поля напряжений, а под действием указанной конвергенции [26, 52]. В соответствии с теорией тектоники плит, понятие внутриплитного поля напряжений возникает, когда рассматривается напряженное состояние литосферы на некотором удалении от границ плиты. Поскольку наша работа посвящена оценке возможности реактивации разломов во внутреннем пространстве ЮКМ, то МОЗ, рассчитанные для условий пограничной зоны конвергенции, не вполне приемлемы для решения таких задач. Для устранения этой проблемы, данные МОЗ и напряжения, полученные от землетрясений в зоне конвергенции, были отфильтрованы. Для дальнейших расчетов были использованы землетрясения, располагающиеся на эмпирически выбранном расстоянии 20 км от активной границы плит в зоне Филиппинских островов и о-ва Борнео (например, граница активной зоны разлома Сан-Андреас составляет около 10 км [52]).

В результате собрана база данных, включающая 135 МОЗ, произошедших в районе исследований и прилегающих районах на глубинах > 5 км с магнитудой > 3 по шкале Рихтера. Из них 115 заимствованы из Global Centroid-Moment-Tensor Project [18, 41] и 20 из [55] (рис. 1).

В последние годы морскими исследованиями Вьетнама и в рамках международного сотрудничества получен большой объем детальных данных по геологии и геофизике дна ЮКМ. Это, прежде всего, относится к сейсмическим исследованиям. Однако большинство сейсмических данных получены нефтегазовыми компаниями при разведке месторождений нефти и газа и являются их коммерческой собственностью с ограниченной возможностью использования и опубликования другими организациями. В данной



**Рис. 1.** Карта гравитационных аномалий Буге ЮКМ с расположением сейсмических профилей и очагов землетрясений, использованных в данной работе (частично опубликовано в [53, 55]).

работе использованы результаты интерпретации материалов следующих законченных проектов: AW-HS; РК-3; PGS-8, 9; WA-74; NOPEC-93; VOR-93; SEAS-95; SEAS-TC; TC-93, 95, 98; TC-03, 6; VGP-09-08, PV, STC-6; CPV-05, 07; РКВЕ-07, 08; JMSU-05, 07 [39, 53, 54]. Сейсмические данные использованы в качестве «опорной» информации для повышения достоверно-

сти выделения разломов и определения их структурных характеристик по результатам гравиметрии [58].

#### Данные гравиметрии и батиметрии

В работе использованы два источника гравиметрических данных: результаты морских набортных гравиметрических наблюдений и данные спутнико-

вой альтиметрии. Морская гравиметрия выполнялась преимущественно в международных экспедициях с участием представителей Вьетнама, России, США, Франции, Германии, Японии и др. Кроме этого, были использованы гравиметрические данные, полученные в рамках Национальных исследовательских проектов, которые выполнялись Институтом морской геологии и геофизики Вьетнамской академии наук и технологий, Вьетнамским институтом нефти и другими вьетнамскими организациями (Национальный проект 48В-III-2, 1986-1990; КТ-03-02., 1991-1995; КНСН-06-04, 1996-1998; КНСН-06-12, 1999-2000; и КС-09-02, 2001-2005) [53].

Другим источником гравиметрических данных явилась спутниковая альтиметрия. Её использование дает возможность получить гравитационное поле с одинаковым разрешением для всего региона с приемлемым временем и затратами, особенно для удаленных районов. В настоящей работе использована сетка значений гравитационных аномалий, полученных по данным спутниковой альтиметрии и батиметрии со стороны ячейки  $1' \times 1'$  (V28.1), созданная по данным многолетних наблюдений со спутников Geosat, Topex / Poseidon, ERS-1, 2, CryoSat-2, Envisat и Jason-1 [45, 53]. Кроме этого, использованы гравиметрические данные, находящиеся в Международном гравиметрическом бюро (BGI) во Франции [28].

Точность и разрешающая способность морских аномалий силы тяжести, полученных с помощью альтиметрии, зависят от множества факторов, включая типичное состояние поверхности моря и близость к суше. В совокупности эти факторы снижают качество спутниковой гравиметрии. Повышение её точности возможно путем совместной обработки с результатами морской набортной гравиметрии. Такой метод, предложенный Чан Туан Зунгом и реализованный в одной из наших предыдущих работ [55], мы использовали в настоящей работе вместе с новой базой гравиметрических данных [57]. В качестве источника судовых гравиметрических данных использованы результаты российско-вьетнамских экспедиций на НИС «Профессор Гагаринский» и «Профессор Полшков» [22, 23], а также международная база морских гравиметрических данных [28].

Для совместного анализа морских и спутниковых гравиметрических данных использован метод коллокации наименьших квадратов. В работе [19] приводится описание метода, а в [56] подробно описывается процедура его применения в наших целях.

По результатам совместной обработки и анализа набортных и спутниковых гравиметрических наблюдений построена карта гравитационных аномалий в редукции Буге (рис. 1).

## МЕТОДЫ

### Определение системы разломов

Метод определения системы разломов в земной коре ЮКМ описан в предыдущей работе, где он был предложен Чан Туан Зунгом с соавторами [55] и в настоящее время обновлен [57]. В частности, был использован максимальный горизонтальный градиент силы тяжести (МГГСТ). Этот параметр фиксирует плотностные границы горных пород, которые часто формируются разломами. В этом случае разломы отображаются линейными зонами векторов МГГСТ, ориентированных в одном направлении. Перед расчетом горизонтальных градиентов аномалии гравитационного поля фильтровались в диапазоне низких частот с разными длинами волн (от 20 до 120 км с шагом 10 км). Это делалось для определения пространственного размещения разломов на разных глубинах.

Положение и величина МГГСТ определялись полиномом второго порядка следующим образом [14]:

$$X_{Max} = \frac{bd}{2a}; \quad G_{Max} = aX_{Max}^2 + bX_{Max} + H[\Delta g]_{i,j}$$

Здесь  $d$  – расстояние между узлами сетки;  $a$ ,  $b$  – коэффициенты полинома, которые вычисляются по сетке гравитационных аномалий.

### Определение современного регионального поля напряжений

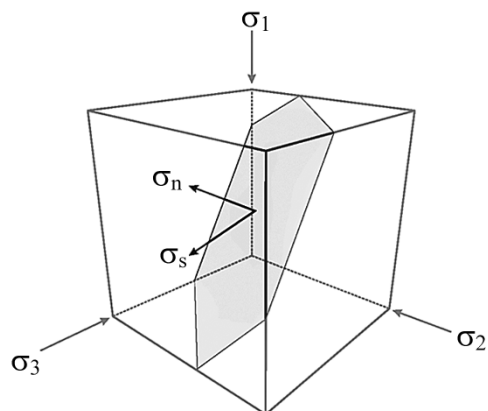
Как показали предшествующие исследования [12, 63], современное поле напряжений внутри тектонических плит контролируется в основном теми же силами, которые осуществляют движение плит в целом. Это было определено путем анализа МОЗ методом обратных напряжений. Этими работами также было показано, что общее поле напряжений характеризуется тремя главными компонентами напряжений ( $\sigma_1$  – сжатие,  $\sigma_2$  – промежуточное и  $\sigma_3$  – растяжение) и отношением напряжений  $\phi$  (рис. 2).

Современное поле напряжений в Южно-Китайском море также было рассчитано с использованием анализа МОЗ. Расчеты производились в соответствии с технологией, подробно описанной в [55], с использованием обновленных данных [57].

Отношение напряжений ( $\phi$ ) определялось следующим образом [12]:  $\phi = \frac{(\sigma_2 - \sigma_3)}{(\sigma_1 - \sigma_3)}$ ,

где  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$  – значения главных напряжений, удовлетворяющих  $\sigma_1 \leq \sigma_2 \leq \sigma_3$ .

После получения направления осей главных напряжений ( $\vec{\sigma}, \vec{\sigma}, \vec{\sigma}$ ) и отношения  $\phi$  определялось напряжение сдвига ( $\sigma_s$ ) и нормальное напряжение ( $\sigma_n$ ) в плоскости разломов. Для определения отношения



**Рис. 2.** Нормальное напряжение ( $\sigma_n$ ) и напряжение сдвига ( $\sigma_s$ ) на произвольной поверхности в поле напряжений, определяемых тремя главными компонентами  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  и  $\sigma_3$ .

напряжений и определения  $\sigma_1$  и  $\sigma_3$  использованы методы, представленные в работе [17].

### Определение тенденции скольжения по поверхности разломов

После расчета параметров регионального поля напряжений была выполнена оценка наличия и величины тенденции скольжения геологических объектов по разломам. Для решения этой задачи использован соответствующий данному случаю метод анализа (slip-tendency analysis), опубликованный в [37]. Названный метод позволяет быстро оценить напряжение и связанную с ним потенциальную активность тектонических разломов. Возможность смещений геологических объектов в плоскости разлома зависит от относительных величин и осевой симметрии главных напряжений [15, 59]. Если известны ориентировка и относительная величина главных напряжений, можно вычислить величину и направление сдвиговых ( $\sigma_s$ ) и нормальных ( $\sigma_n$ ) напряжений. Скольжение происходит по поверхности разлома, когда разрешенное напряжение сдвига равно или превышает сопротивление трения скольжению, которое пропорционально нормальному напряжению на указанной поверхности [30] (рис. 2). Поэтому тенденция скольжения по разлому, на который действует региональное поле напряжений, определяется соотношением напряжения сдвига и нормального напряжения в плоскости разлома. Предполагается, что направление скольжения по поверхности разлома параллельно разрешенному направлению напряжения сдвига [37, 62].

В соответствии с работой [62], тенденция к скольжению ( $T_s$ ) определена следующим образом:

$$T_s = \frac{|\sigma_s|}{\mu|\sigma_n|},$$

где  $\sigma_s$  – напряжение сдвига,  $\sigma_n$  – нормальное напряжение,  $\mu$  – коэффициент статического трения на поверхности разлома,  $\mu$  выбран равным 0.65 [46]. Относительная величина тенденции скольжения по плоскости разлома колеблется от 0.0 до 1.0.

### Определение относительных смещений в земной коре и прогноз возможной реактивации системы разломов

Для указанных определений была использована теория деформаций и перемещений в земной коре [40], а также результаты изложенных выше расчетов и предшествующих исследований [55]. На указанной основе были сделаны необходимые дополнительные расчеты; результаты представлены картами участков земной коры с различной возможностью горизонтальных и вертикальных перемещений, которые демонстрируются ниже (рис. 6, 7)

Итак, для оценки возможной реактивации разломов в Южно-Китайском море определены три информативных источника. Они включают наличие и расположение участков с разной тенденцией сдвиговых дислокаций, а также участков с разной возможностью относительных вертикальных и горизонтальных смещений в земной коре.

По этим источникам рассчитан прогноз возможной реактивации системы разломов по формуле:

$$H = \sum_{j=1}^n W_j X_{ij},$$

где  $H$  – индекс возможной реактивации разлома,  $W_j$  – вес  $j$ -го информативного источника,  $X_{ij}$  –  $i$ -й вес информативного источника  $j$ .

На основе расчетов построена карта прогноза реактивации разломов в различных районах ЮКМ, представленная ниже при обсуждении результатов выполненной работы (рис. 8).

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

#### Система разломов в земной коре Южно-Китайского моря

На рис. 3 показана региональная система разломов, полученная путем анализа пространственного распределения максимального горизонтального градиента силы тяжести с использованием имеющихся сейсмических данных. Как видно, общая картина дизъюнктивных структур в регионе довольно сложная. Однако на этом фоне можно выделить несколько зон, представленных, как правило, группой сближенных разломов одного направления и, видимо, общего генезиса. Простирание таких зон различно, что, на наш взгляд, свидетельствует об их дифференцированном происхождении и участии в различных тектонических процессах.

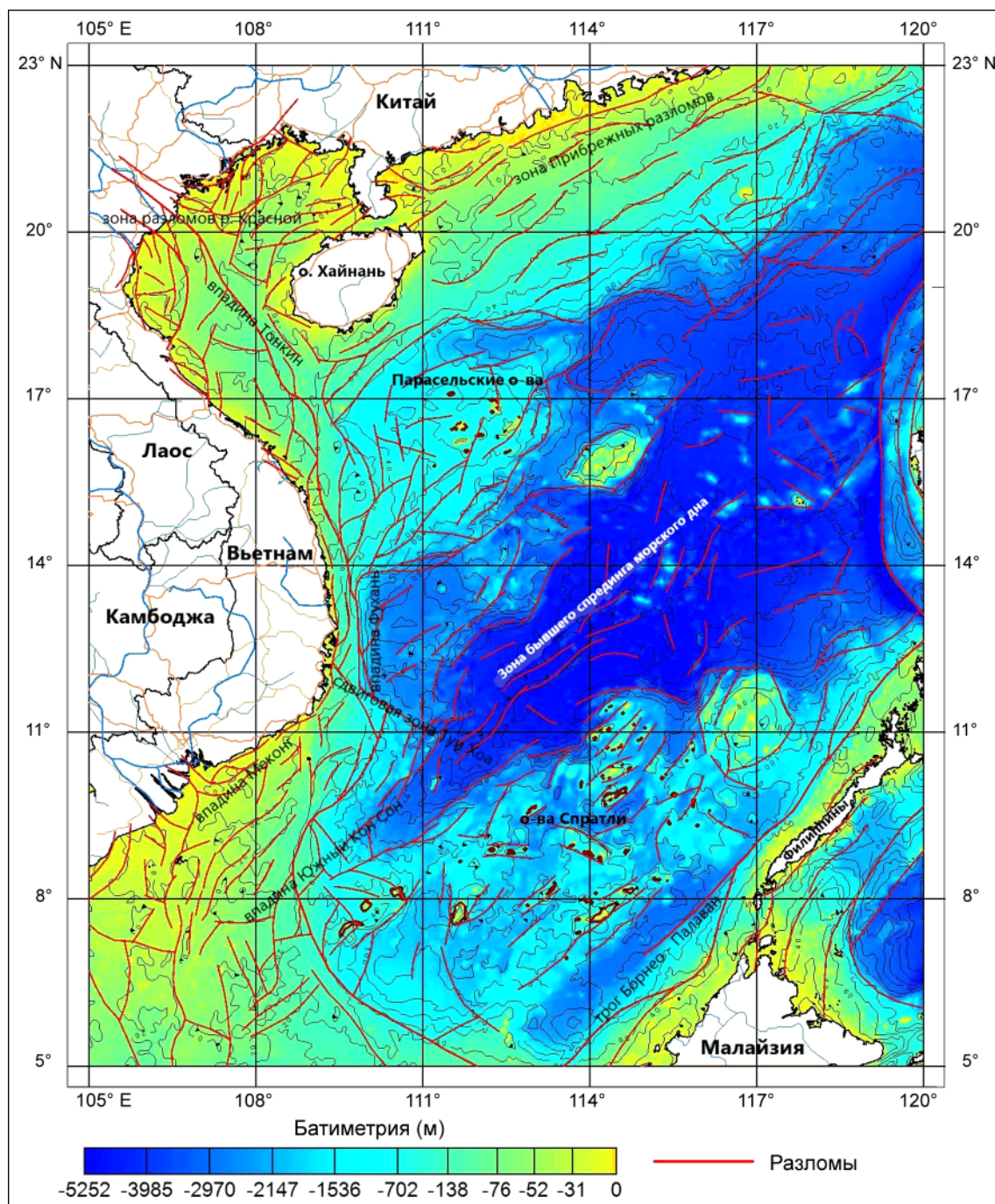


Рис. 3. Батиметрическая карта и система разломов в земной коре ЮКМ (ранее опубликована в [53, 55]).

Так, зона разломов реки Красной простирается в СЗ – ЮВ направлении; разломы, протягивающиеся вдоль меридианов 109°–110° в.д., имеют меридиональное (С-Ю) направление; зона Прибрежных разломов и зона бывшего спрединга морского дна направлены в направлении СВ-ЮЗ.

Все это, по нашему мнению, свидетельствует о том, что существующая в регионе сеть разломов сформирована слиянием эффектов разных тектони-

ческих процессов, имевших место в геологическом прошлом.

#### Современное региональное поле напряжений в земной коре Южно-Китайского моря

Общий вид поля напряжений в земной коре Южно-Китайского моря представлен на рисунке 4. Для расчета его параметров весь регион был разделен на 4 зоны. В основе этого лежит неравномерное

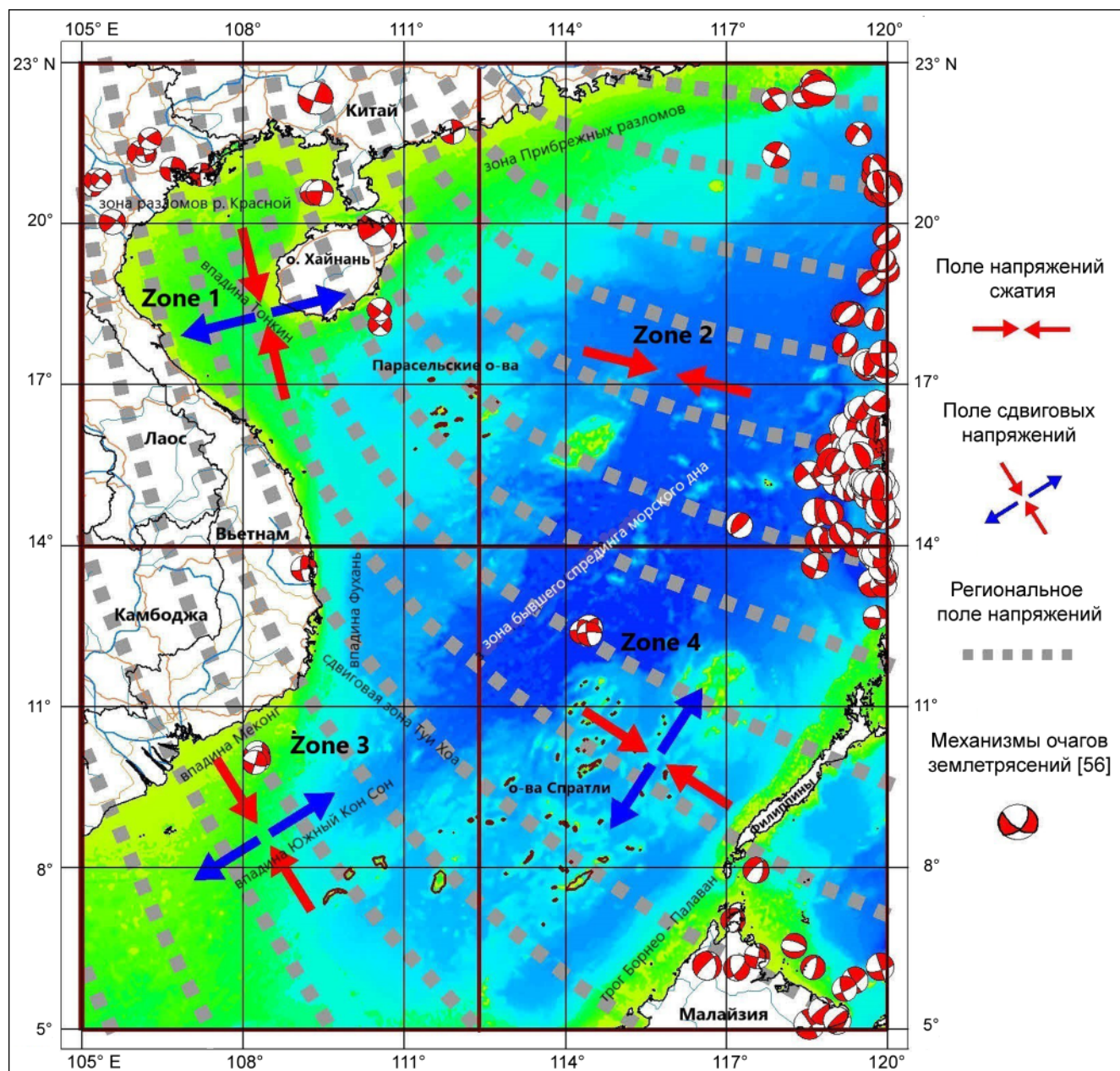


Рис. 4. Карта современного регионального поля напряжений в земной коре ЮКМ (ранее опубликована в [55]).

пространственное распределение землетрясений, их группирование в четырех районах Южно-Китайского моря и его обрамления (рис. 4). Как видно из рисунка, все очаги землетрясений группируются в следующих районах исследуемого региона: Северный Вьетнам и ближайшие территории Китая, включая о. Хайнань; район впадины Меконг; зона конвергенции на западе Филиппинских островов и о. Борнео. Каждый из указанных районов характеризуется своей тектонической обстановкой и кинематикой разломов, а также включает землетрясения с одинаковым режимом напряжений и их ориентировкой. С учетом этих особенностей

вся изучаемая площадь была разделена на указанные 4 зоны. Их границы проведены по широте 14° с.ш. и долготе 12.5° в.д. На рис. 4 они обозначены жирными темно-коричневыми линиями.

Результат выполненных расчетов по зонам показан в таблице 1, а общее поле напряжений – на рис. 4.

Как видно (рис. 4), поле напряжений в зоне 1 характеризуется сжимающим напряжением субмеридионального (СЗ-ЮВ) и растягивающим напряжением субширотного (ЮЗ-СВ) направлений. Похожая ситуация наблюдается в зонах 3 и 4. В их пределах также присутствует поле сжимающих (СЗ-ЮВ) и растягива-



Таблица. Параметры современного поля напряжений в земной коре Южно-Китайского моря.

№ зоны	Кол-во землетрясений	$\sigma_1$		$\sigma_2$		$\sigma_3$		$\phi$	$S_{Hmax}$
		Азимут простирания	Угол падения	Азимут простирания	Угол падения	Азимут простирания	Угол падения		
1	15	163	10	335	79	073	01	0.5	163
2	95	280	16	014	14	140	69	0.45	100
3	5	148	03	260	81	058	08	0.80	148
4	20	310	07	058	67	217	20	0.23	130

Примечание.  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  и  $\sigma_3$  – главные напряжения,  $\phi$  – отношение напряжений,  $S_{Hmax}$  – максимальное горизонтальное напряжение.

ющих (ЮЗ-СВ) напряжений с некоторым разворотом их векторов к широтной ориентировке. Существенное отличие имеет зона 2. Эта часть земной коры ЮКМ характеризуется только сжимающим полем напряжений.

Приведенные характеристики напряжений в зонах 1 и 3 представляют собой, на наш взгляд, результат комбинированного воздействия сил конвергенции окружающих литосферных плит. Определяющими среди них, видимо, было столкновение плит в зоне Восточных Гималаев, активная субдукция Индийской плиты в зоне остров Суматра-Андаманское море и, возможно, более локальные напряжения, вызванные вариациями гравитационных сил в условиях меняющихся деформаций [50]. Характеристики поля напряжений в зоне 4 могли быть сформированы комбинированным вкладом конвергенции плит в Восточных Гималаях, а также активной субдукцией под морем Сулавеси и Филиппинами [51].

Некоторые исследователи предполагают, что поле сжимающих напряжений СЗ-ЮВ направления в пределах всего блока Борнео могло быть результатом столкновения с Австралийской континентальной плитой вблизи Тимора с последующим распространением напряжений на плиты Сунда, Тимор, Банда и Молукка [29]. В пределах зоны 2 происходит активная конвергенция Евроазиатской и Тихоокеанской литосферных плит. Современная скорость указанной конвергенции составляет около 8 см/год в направлении ЮВ-СЗ [61]. Это создает сжимающее геодинамическое напряжение такого же направления.

На основании изложенного можно сделать вывод, что региональное поле напряжений в земной коре Южно-Китайского моря создает общий сдвиговый тектонический режим с ориентировкой сжимающих напряжений в направлении ЮВ-СЗ и растягивающих напряжений в направлении СВ-ЮЗ.

#### Тенденция сдвиговых смещений по разломам в земной коре Южно-Китайского моря

Эта тенденция (предрасположенность) определена на основе современного поля напряжений в указанных выше 4 зонах. Результат показан на рис. 5.

Рисунок иллюстрирует различную степень предрасположенности разломов к сдвиговым смещениям. Прежде всего, видно, что максимальная тенденция к сдвигам сосредоточена в юго-западной половине Южно-Китайского моря. Её граница проходит, примерно, от устья реки Красной в юго-восточном направлении через Парасельские острова далее в том же направлении до Филиппинских островов. В пределах этой области максимальную предрасположенность к сдвигам имеют зоны крупных разломов. Сюда относятся: зона разломов реки Красной, сдвиговая зона Туи Хоа, зона бывшего спрединга морского дна ЮКМ, район островов Спратли и разломы, ограничивающие трог Борнео-Палаван. Здесь же существует несколько участков с низкой предрасположенностью разломов к сдвиговым смещениям. Они тяготеют к впадинам Фухань, Меконг и Южный Кон Сон.

В северо-восточной половине Южно-Китайского моря преобладают разломы с низкой тенденцией сдвиговых смещений. На этом фоне выделяются лишь отдельные участки с повышенной сдвиговой тенденцией. Участки с минимальной предрасположенностью к сдвигам располагаются севернее Парасельских островов и в зоне Прибрежных разломов.

Как упоминалось выше, поля напряжений в указанных районах имеют различный генезис. В значительной степени их происхождение тесно связано со столкновением литосферных плит в Восточных Гималаях [48] и, по всей вероятности, они все еще находятся под воздействием удаленных тектонических сил. Соответственно, напряжения, сформированные в прошлом, продолжают, видимо, оставаться основным источником воздействия на современную систему разломов в этой части ЮКМ. С другой стороны, активная конвергенция Евроазиатской литосферной плиты с плитой Тихого океана вносит существенный вклад в формирование регионального поля напряжений в восточной половине ЮКМ. В районе островов Борнео и Палаван еще одним источником формирования поля напряжений может быть активная субдукция под морем Сулавеси.

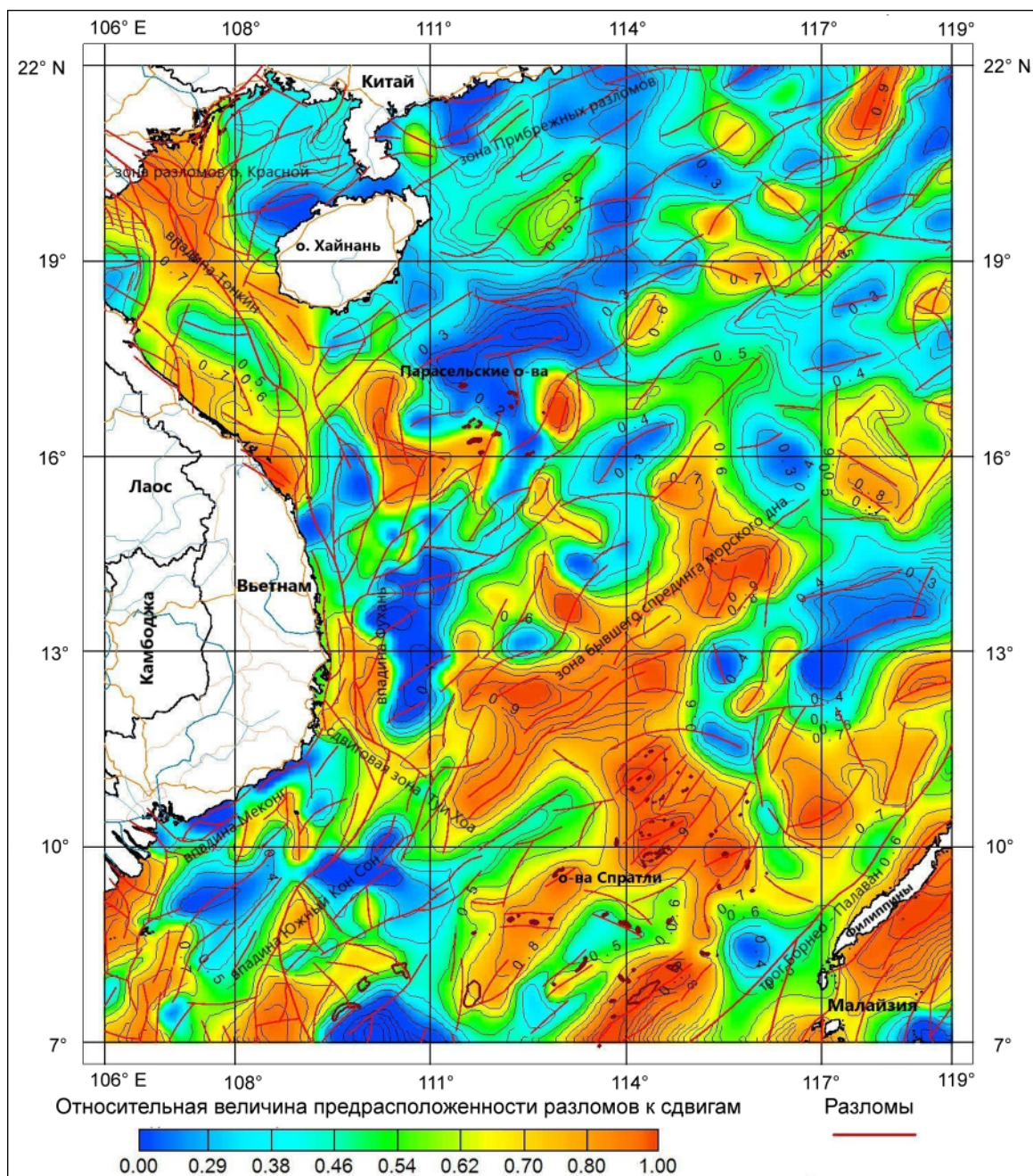


Рис. 5. Карта разломов в земной коре ЮКМ и их предрасположенности к сдвиговым (strike-slip) смещениям.

### Относительные горизонтальные и вертикальные смещения в земной коре Южно-Китайского моря

Как показали расчеты, различные участки земной коры ЮКМ в условиях современного регионального поля напряжений имеют неодинаковую предрасположенность к горизонтальным и вертикальным смещениям.

На рис. 6 показана общая картина такой предрасположенности к горизонтальным сдвиговым смеще-

ниям. Нетрудно заметить, что участки максимальной предрасположенности к горизонтальным смещениям приурочены, в основном, к зонам крупных разломов вблизи Вьетнама. В частности, сюда относится зона разломов реки Красной и её подводное продолжение в Тонкинском заливе, а также разломы, простирающиеся вдоль 109°–110° в.д. Повышенная тенденция к горизонтальным смещениям наблюдается в сдвиговой зоне Туи Хоа. Прогнозируемые смещения в этом районе направлены преимущественно с севера на юг.

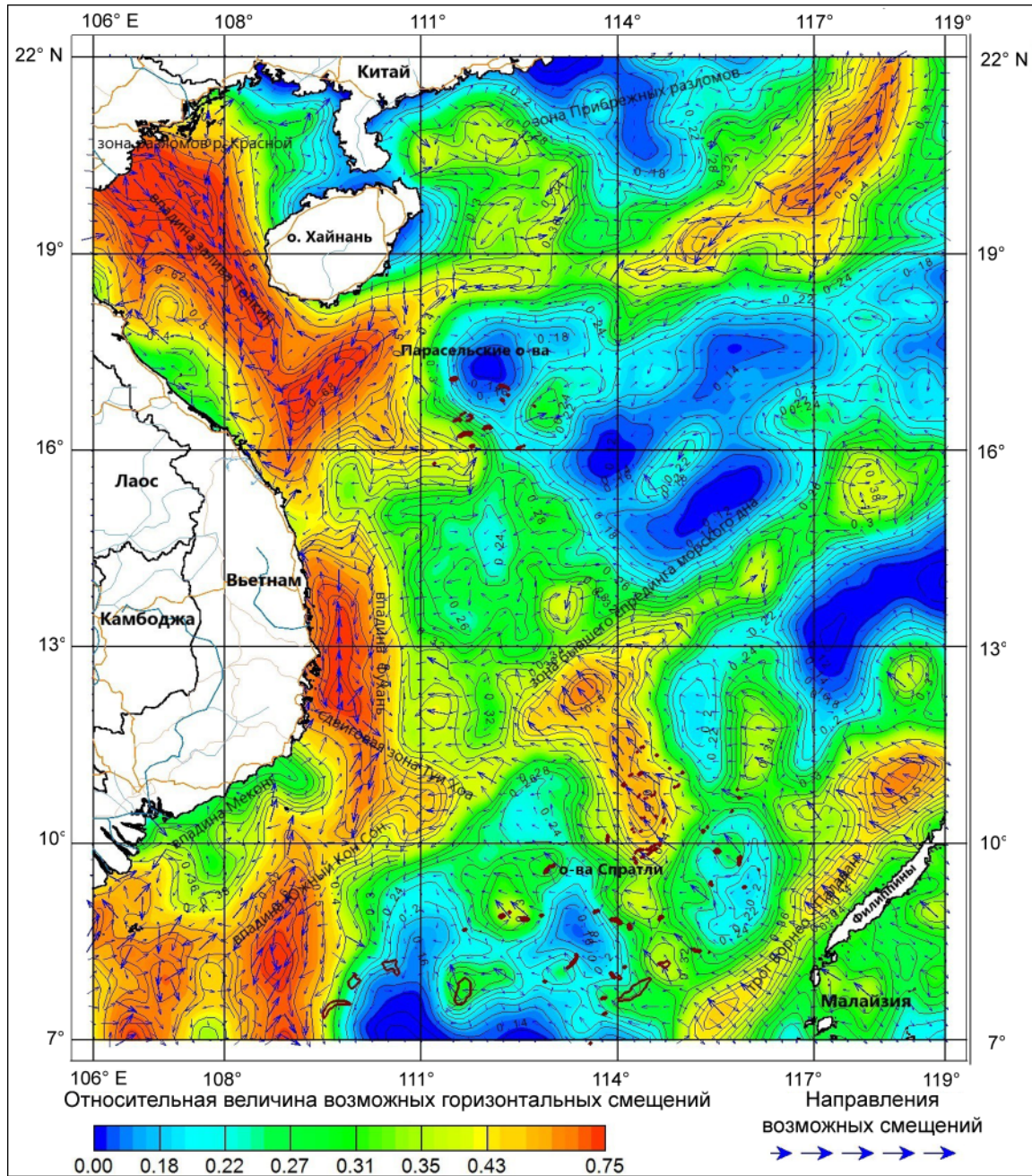


Рис. 6. Карта возможных относительных горизонтальных смещений в земной коре ЮКМ (ранее опубликована в [55]).

На остальной исследуемой площади повышенная предрасположенность к горизонтальным смещениям наблюдается в виде разобленных относительно небольших участков. Наиболее крупные из них располагаются в основании континентального склона Китая, севернее островов Спратли, и в районе трога Борнео-Палаван. Направления и относительные величины возможных смещений на этих участках разные: в основании континентального склона Китая разнонаправленные и незначительные по величине; в районах

островов Спратли и трога Борнео-Палаван возможны значительные смещения на северо-запад от их современного положения.

Минимальная тенденция к сдвиговым смещениям прогнозируется в районе Парасельских островов, в глубоководной котловине к востоку от этих островов, в пределах шельфа Китая и некоторых других местах ЮКМ.

Таким образом, зона разломов реки Красной и район Тонкинского залива, а также разломы на шель-

фе и континентальном склоне Центрального и Юго-Восточного Вьетнама являются наиболее вероятными тектоническими структурами для горизонтальных сдвиговых дислокаций, что может быть источником землетрясений и сопутствующих опасных явлений.

Общее состояние предрасположенности к *вертикальным* смещениям в земной коре, показанное на рисунке 7, отличается от предрасположенности к горизонтальным сдвиговым дислокациям. В данном случае рассматривается тенденция к смещениям вверх или вниз.

Большинство участков, имеющих тенденцию к поднятию, сконцентрировано в центральной части ЮКМ, между широтами  $10^{\circ}$ – $20^{\circ}$  с.ш. К наиболее крупным из них относятся: впадина залива Тонкин; участки вьетнамского шельфа в северном и южном обрамлении впадины Фухань; участок, примыкающий с востока к острову Хайнань; район, охватывающий северные острова Спратли, и обширный район, ограниченный меридианами  $116^{\circ}$ – $119^{\circ}$  в.д. и широтами  $16^{\circ}$ – $19^{\circ}$  с.ш.

Крупные участки с высокой тенденцией к погружению располагаются в южной половине ЮКМ. Сюда относится центральная часть и восточная периферия впадины Фухань, район впадин Меконг, Южный Кон Сон и разделяющий их вал Кон Сон, район к востоку и юго-востоку от островов Спратли, а также обширный район, примыкающий к острову Палаван и совпадающий с северной половиной трога Борнео-Палаван. В целом, намечается некоторое тяготение участков с тенденцией погружения к уже существующим осадочным депрессиям и их периферии. Исключение составляет осадочный бассейн залива Тонкин.

Как видно, и в этом случае вьетнамский шельф, начиная от Тонкинского залива и заканчивая устьем реки Меконг, представляет собой потенциально опасную зону, где могут произойти вертикальные разнонаправленные тектонические подвижки с опасными последствиями.

### **Прогноз возможной реактивации системы разломов в земной коре ЮКМ**

Как отмечено выше, система разломов в земной коре ЮКМ формировалась и развивалась в течение нескольких этапов и в настоящее время не активна. Однако, как показывают расчеты, существующее региональное поле напряжений продолжает оказывать влияние и способно реактивировать эту тектоническую систему (рис. 8).

Общая картина такой возможности хорошо коррелируется с общей тенденцией сдвиговых смещений (*strike-slip tendency*) по разломам (рис. 5) и прогнозом относительных горизонтальных сдвиговых дис-

локаций в земной коре (рис. 6). Таким образом, зоны разломов, имеющих тенденцию к горизонтальным сдвиговым смещениям, одновременно являются тектоническими структурами с высокой вероятностью реактивации (рис. 8). Отсюда можно сделать вывод, что в случае новой тектонической активизации основной формой дислокаций по разломам будут горизонтальные сдвиговые смещения.

Участки с высокой вероятностью реактивации располагаются преимущественно в западной и южной части ЮКМ. Здесь они сосредоточены в районах впадин залива Тонкин, Фухань, Южный Кон Сон, частично Меконг и образуют пояс потенциально опасных тектонических структур, обрамляющих всю береговую зону Вьетнама.

Кроме этого участки с высокой вероятностью реактивации включают системы разломов, расположенные в юго-восточном ограничении зоны бывшего спрединга морского дна, в районе островов Спратли и северной половине трога Борнео-Палаван.

Участки с низкой вероятностью реактивации преобладают в северной половине ЮКМ. Умеренная и низкая вероятность реактивации прогнозируется в зоне Прибрежных разломов, в районе Парасельских островов и на отдельных участках глубоководной котловины ЮКМ восточнее указанных островов.

Среди региональной системы разломов многие являются глубинными тектоническими структурами. Глубинные разломы, имеющие высокий коэффициент внутреннего трения, под воздействием регионального поля напряжений накапливают больше энергии. При достаточном уровне энергии они могут активизироваться, разрушая глубинную геологическую структуру и вызывая землетрясения. При достижении верхних слоев геологического пространства они могут создавать благоприятные условия для образования подводных оползней и, возможно, цунами.

Разломы неглубокого заложения (коровые разломы) имеют низкий коэффициент внутреннего трения и должны чаще реагировать на воздействие регионального поля напряжений. К тому же с их активностью связаны максимальные коровые деформации и подвижки геологических структур, вызывающие разрушительные землетрясения с известными последствиями. Поэтому они являются наиболее опасными структурами, реактивация которых в данном случае может привести к опасным последствиям для прибрежных районов Вьетнама.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

На основе интерпретации геофизических данных определена система тектонических разломов в

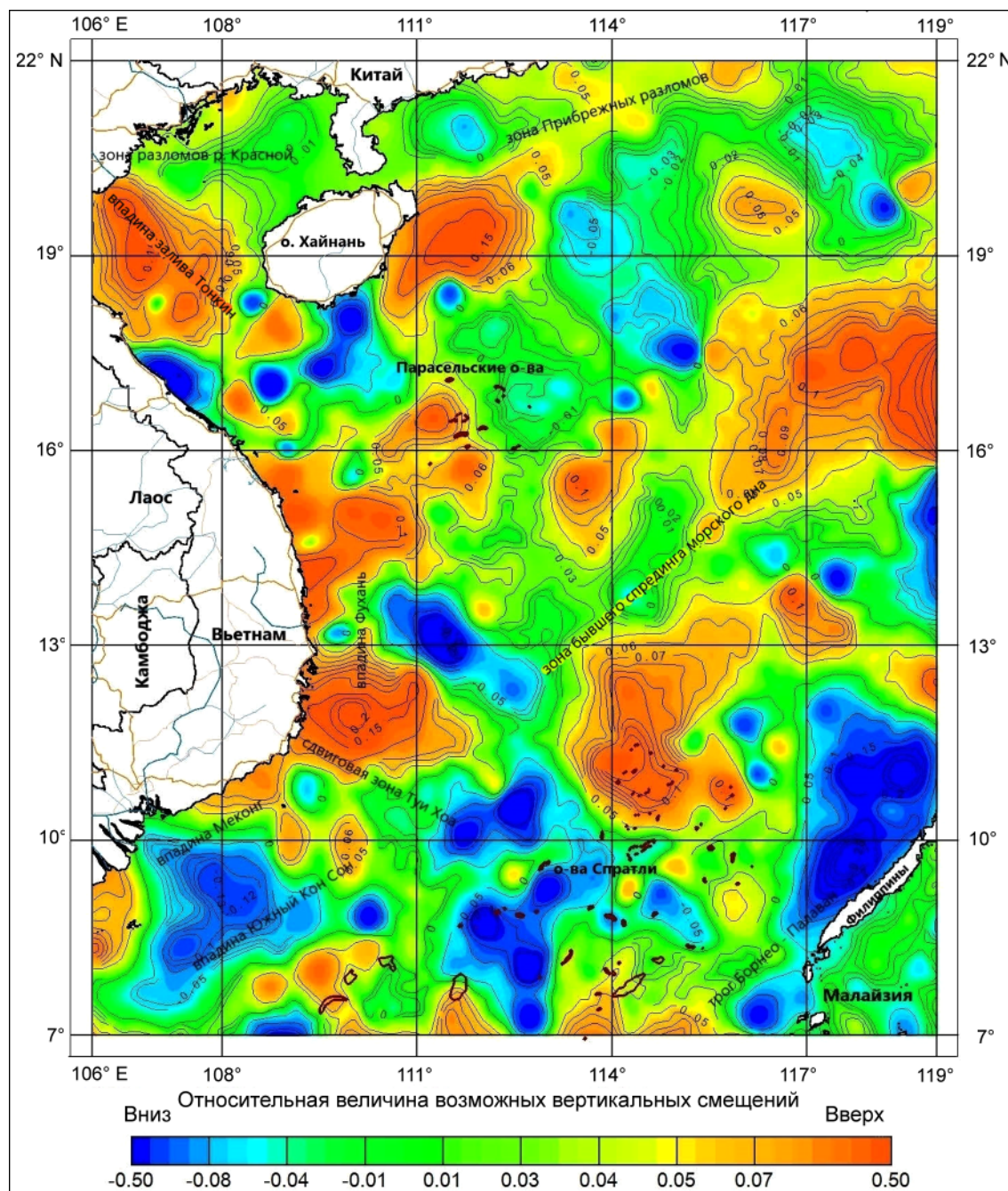


Рис. 7. Карта возможных относительных вертикальных смещений в земной коре ЮКМ (ранее опубликована в [55]).

регионе Южно-Китайского моря. Путем анализа механизмов очагов землетрясений, произошедших в регионе ЮКМ за период более 100 лет, рассчитано поле региональных напряжений в земной коре. Определена тенденция сдвиговых дислокаций по разломам и сделана оценка возможности сдвиговых горизонтальных и вертикальных перемещений в земной коре. На этой основе сделано заключение о возможной реактивации системы разломов на разных участках Южно-Китайского моря.

Сделан вывод, что в случае новой тектонической активизации основной формой дислокаций по разломам будут горизонтальные сдвиговые смещения. Наибольшую опасность представляет реактивация разломов неглубокого заложения (коровых разломов). В силу пониженного коэффициента внутреннего трения они чаще, чем глубинные разломы, должны реагировать на воздействие регионального поля напряжений и возобновлять активность. С этим связаны максимальные деформации и подвижки геологических

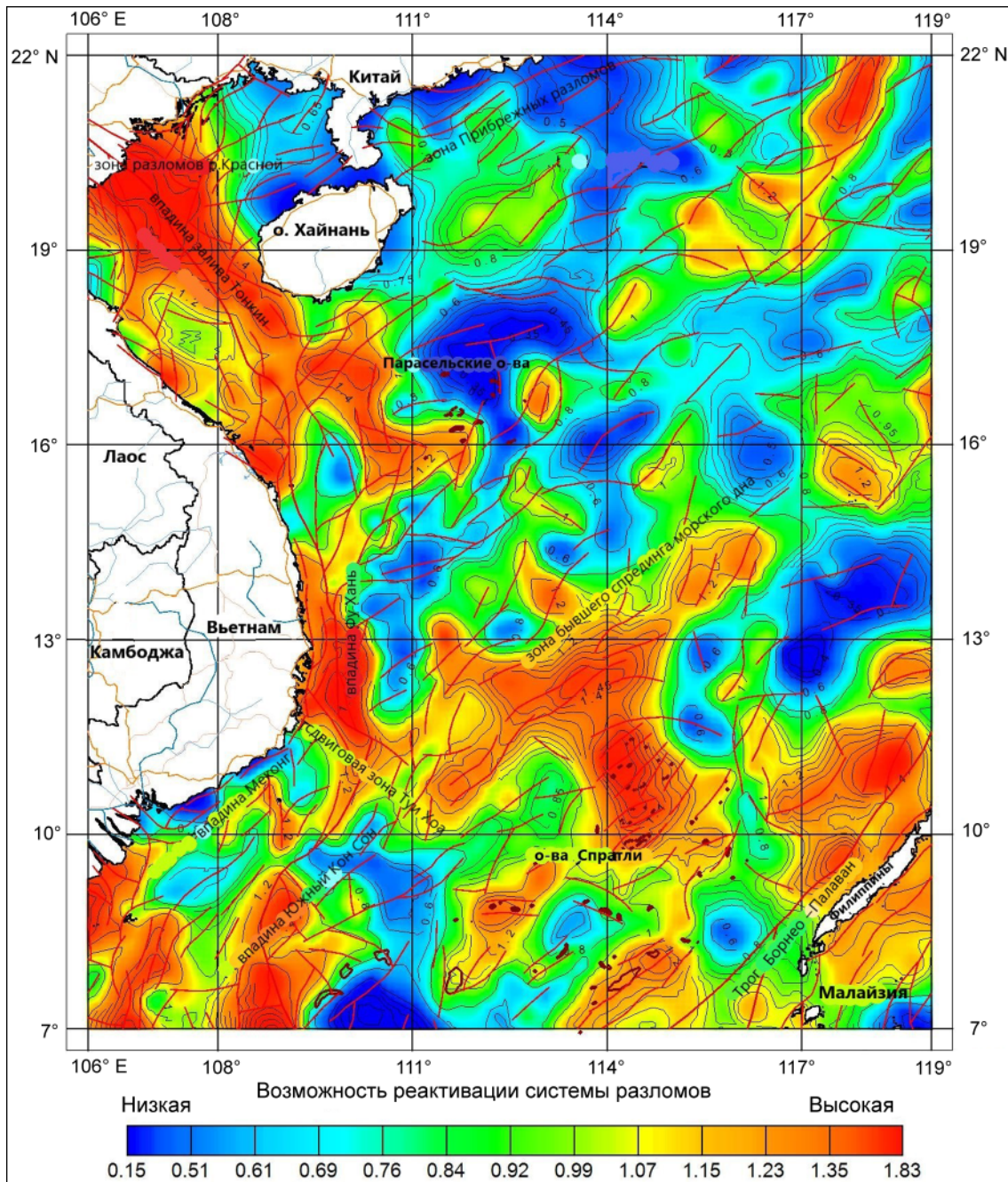


Рис. 8. Карта прогноза возможной реактивации разломов в земной коре ЮКМ.

структур, вызывающие разрушительные землетрясения с известными последствиями.

Показано, что участки с высокой вероятностью реактивации располагаются преимущественно в западной части ЮКМ. В частности, они сосредоточены в районах впадин Тонкин, Фухань, Южный Кон Сон, частично Меконг и образуют пояс потенциально опасных тектонических структур, обрамляющих всю береговую зону Вьетнама. Наиболее опасные участки

в этом поясе приурочены к разломным системам впадин залива Тонкин и Фу Хань, а также к сдвиговой зоне Туи Хоа.

Выполненные исследования впервые дали научный прогноз возможности реактивации тектонических разломов в земной коре Южно-Китайского моря. Полученные результаты имеют большое значение для решения проблем, связанных с опасными геологическими процессами (землетрясения, подвод-

ные оползни и др.) в прибрежных районах Вьетнама. Это необходимо учитывать при дальнейшей научной, производственной и социальной деятельности в этом регионе.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Данные исследования выполнены при финансовой поддержке в рамках проектов: UQDTCB.02/21-22, VAST06.01/20-21 и QTRU02.01/20-21 (Россия-Вьетнам), QTRU02.02/20-21, VAST06.05/21-22, за что авторы выражают свою благодарность.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горшков А.П. Исследования подводных вулканов в 10-ом рейсе НИС «Вулканолог» // Вулканология и сейсмология. 1981. № 6. С. 39–45.
2. Горшков А.П., Иваненко А.Н., Рашидов В.А. Новые сведения об особенностях проявления подводной вулканической деятельности на шельфе Южно-Китайского моря по данным гидромагнитной съемки // Вулканология и сейсмология. 1991. № 4. С. 80–85.
3. Дан Ван Бат. Новейшая тектоника северной части Вьетнама // Вестн. ЛГУ. 1979. № 24. Вып. 4. С. 90–95.
4. Рашидов В.А. Возможности гидромагнитной съемки при поиске подводных вулканов (на примере позднекайнозойского вулканизма Южно-Китайского моря) // Вулканология и сейсмология. 1997. № 1. С. 17–31.
5. Рашидов В.А. Геомагнитные исследования подводных вулканов с борта НИС «Вулканолог»: Материалы ежегодной конф., посвященной Дню вулканолога, 28–31 марта 2007 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2007. С. 289–300.
6. Рашидов В.А. Геомагнитные исследования при изучении подводных вулканов островных дуг и окраинных морей западной части Тихого океана: Автореф. дис. ... канд. технич. наук. Петропавловск-Камчатский, 2010. 27 с.
7. Родников А.Г. Островные дуги западной части Тихого океана. М.: Наука, 1979. 150 с.
8. Родников А.Г., Забаринская Л.П., Рашидов В.А., Сергеева Н.А., Нисилевич М.В. Глубинное строение континентальных окраин региона Южно-Китайского моря // Вестн. КРАУНЦ. Науки о Земле. 2011. № 2. Вып. 18. С. 52–72.
9. Родников А.Г., Забаринская Л.П., Рашидов В.А., Сергеева Н.А. Геодинамические модели глубинного строения регионов природных катастроф активных континентальных окраин. М: Науч. мир, 2014. 172 с.
10. Федоров П.И. Кайнозойский вулканизм в зонах растяжения на восточной окраине Азии. М.: ГЕОС, 2006. 316 с.
11. Angelier J. Tectonic analysis of fault slip data // J. Geophys. Res. 1984. V. 89. P. 5835–5848.
12. Angelier J. Inversion of field data in fault tectonics to obtain the regional stress. Part 3. A new rapid direct inversion method by analytical means // Geophys. J. Int. 1990. V. 103. P. 363–376.
13. Barth A., Reinecker J., Heidbach O. Stress derivation from earthquake focal mechanisms // World Stress Map Project Guidelines. 2008. 12 p.
14. Blakely R.J., Simpson, R.W. Approximating edges of source bodies from magnetic or gravity anomalies // Geophysics. 2008. V. 51. P. 1494–1498.
15. Bott M.H.P. The mechanisms of oblique slip faulting // Geol. Mag. 1959. V. 96. P. 109–117.
16. Briais A., Patriat P., Tapponnier P. Updated interpretation of magnetic anomalies and seafloor spreading stages in the South China Sea: Implications for the Tertiary tectonics of Southeast Asia // J. Geophys. Res. 1993. V. 98 (B4). P. 6299–6328.
17. Delvaux D., Sperner B. New aspects of tectonic stress inversion with reference to the TENSOR program // Geol. Soc. London Spec. Publ. January 2003. DOI: 10.1144/GSL.SP.2003.212.01.06.
18. Ekström G., Nettles M., Dziewonski A.M. The global CMT project 2004-2010: Centroid-moment tensors for 13,017 earthquakes // Phys. Earth Planet. Inter. 2012. V. 200–201. P. 1–9. DOI:10.1016/j.pepi.2012.04.002.
19. Forsberg R., Tscherning C.C. Geodetic gravity field modelling programs // Copenhagen.: Univ. Copenhagen, 2008.
20. Fyhn M.B.W., Boldreel L.O., Nielsen L.H. Geological development of the Central and South Vietnamese margin: implications for the establishment of the South China Sea, Indochinese escape tectonics and Cenozoic volcanism // Tectonophysics. 2009. N 478. P. 184–214.
21. Gephart J.W., Forsyth D.W. An improved method for determining the regional stress tensor using earthquake focal mechanism data: Application to the San Fernando earthquake sequence // J. Geophys. Res. 1984. V. 89. P. 9305–9320.
22. Gravity and magnetic data of RV Professor Gagarinskiy (Russia). 1990–1992.
23. Gravity, magnetic and seismic data of RV Professor Polshkov (Russia). 2007–2008.
24. Hall R. Cenozoic geological and plate tectonic evolution of SE Asia and the SW Pacific: computer-based reconstructions and animations // J. Asian Earth Sci. 2002. V. 20. P. 353–434.
25. Hall R., Van Hattum M.W.A., Spakman W. Impact of India-Asia collision on SE Asia: The record in Borneo // Tectonophysics. 2008. V. 451. P. 366–389.
26. Heidbach O., Tingay M., Barth A., Reinecker J., Kurfeß D., Müller B. The World stress map based on the database release 2008, equatorial scale 1:46,000,000, Commission for the Geological Map of the World, Paris. 2009.
27. Heidbach O., Rajabi M., Cui X., Fuchs K., Müller B., Reinecker J., Reiter K., Tingay M., Wenzel F., Xie F., Ziegler M.O., Zoback M.-L., Zoback M.D. The World stress map database release 2016: Crustal stress pattern across scales // Tectonophysics. 2018. V. 744. P. 484–498.
28. <http://bgi.obs-mip.fr/data-products/Gravity-Databases/Marine-Gravity-data>
29. Ingram G.M., Chisholm T.J., Grant C.J., Hedlund C.A., Stuart-Smith P., Teasdale J. Deepwater North West Borneo: hydrocarbon accumulation in an active fold and thrust belt // Mar. Pet. Geol. 2004. V. 21. P. 879–887.
30. Jaeger J.C., Cook, N.G. W. Fundamentals of rock mechanics (third edition). London. United Kingdom, Chapman and Hall. 1979. 593 p.
31. Karig D.E. Evolution of arc systems in the western Pacific // Annu. Rev. Earth Planet. Sci. 1974. V. 2. P. 51–75.
32. McFarland J.M., Morris A.P., Ferrill D.A. Stress inversion using slip tendency // Computers & Geosciences. 2012. V. 41. P. 40–46.
33. McKenzie D.P. The relation between fault plane solutions for

- earthquakes and the directions of the principal stresses // *Bull. Seismol. Soc. Am.* 1969. V. 59. P. 591–601.
34. Michael A.J. Use of focal mechanisms to determine stress: a control study // *J. Geophys. Res.* 1987. V. 92. P. 357–368.
  35. Michel G.W., Yu Y.Q., Zhu S.Y. et al. Crustal motion and block behavior in SE-Asia from GPS measurements // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2001. V. 187. P. 239–244.
  36. Morley C.K. A tectonic model for the Tertiary evolution of strike-slip faults and rift basins in SE Asia // *Tectonophysics.* 2002. V. 347. P. 189–215.
  37. Morris A., Ferrill D.A., Henderson D.B. Slip-tendency analysis and fault reactivation // *Geol.* 1996. V. 24. P. 275–278.
  38. NEIC PDE catalog. National Earthquake Information Center, U.S. Geological Survey. <http://earthquake.usgs.gov/regional/neic/index.php>.
  39. Nguyen Trong Tin, Tran Tuan Dung et al. Tectonic characteristics of Cenozoic basins in the East Vietnam Sea based on new studied results / International conference on science and technology – 35 years of Vietnam Petroleum. 2010. P. 57-73.
  40. Okada Y. Internal deformation due to shear and tensile faults in half-space // *Bull. Seism. Soc. Amer.* 1992. V. 82, N 2. P. 1018–1040.
  41. Olsen K., Nettles M. Patterns in glacial-earthquake activity around Greenland, 2011-2013 // *J. Glaciology.* 2017. V. 63. P. 1077–1089.
  42. Patte E. Description de l'île des Cendres, volcan apparu au large de la cote d'Annam (1923) // *Bull. Volcanol.* 1925. V. 2. P. 162–172.
  43. Patte E. Etude de l'île des Cendres, volcan apparu au large de la cote d'Annam // *Bull. Serv. Geol. de l'Indochina.* 1925. V. 13. Fasc. 2. P. 162–172.
  44. Pin Yan, Yanlin Wang, Hailing Liu. Post-spreading transpressive faults in the South China Sea Basin // *Tectonophysics.* 2008. V. 450, Is. 1–4. P. 70–78.
  45. Sandwell D.T., Müller R.D., Smith W.H.F., Garcia E., Francis R. New global marine gravity model from CryoSat-2 and Jason-1 reveals buried tectonic structure // *Sci.* 2014. V. 346, N 6205. P. 65–67. doi: 10.1126/science.1258213
  46. Schellart W.P. Shear test results for cohesion and friction coefficients for different granular materials: scaling implications for their usage in analogue modeling // *Tectonophysics.* 2000. V. 324. P. 1–16.
  47. Studies in East Asian tectonics and resources (SEATAR). CCOP Project. Bangkok, Thailand, 1981. 250 p.
  48. Tapponnier P., Peltzer G., Le Dain A.Y., Armijo R., Cobbold P. Propagating extrusion tectonics in Asia: new insights from simple experiments with plasticine // *Geol.* 1982. V. 10. P. 611–616.
  49. Taylor, B., Hayes, D.E. Origin and history of the South China Sea Basin / D.E. Hayes (Ed.). The tectonic and geologic evolution of southeast Asian seas and islands / *Geophys. Monogr., AGU, Washington, D.C.* V. 27. P. 23–56.
  50. Tingay M., Hillis R., Morley C.K., Swarbrick R., Drake S. Present day stress orientation in Brunei: a snapshot of 'prograding tectonics' in a Tertiary delta // *J. Geol. Soc. London,* 2005. V. 162, N 39. P. 49.
  51. Tingay M., Morley C., King R., Hillis R., Coblenz D., Hall R. Present-day stress field of Southeast Asia // *Tectonophysics.* 2010. V. 482. P. 92–104.
  52. Townend J. What do faults feel? Observational constraints on the stresses acting on seismogenic faults / *Earthquakes: Radiated energy and the physics of faulting: Geophysical Monograph Series.* 2006. V. 170. P. 313–327.
  53. Tran Tuan Dung, Bui Cong Que, Nguyen Hong Phuong. Cenozoic basement structure of the South China Sea and adjacent areas by modeling and interpreting gravity data // *Russian J. Pacific Geol.* 2013. V. 13, N 4. P. 227–236.
  54. Tran Tuan Dung, Nguyen Quang Minh et al. Studying and warning the submarine landslide hazard in the Vietnam South central continental shelf / National Project, N KC.09.11/11-15. 2012-2015.
  55. Tran Tuan Dung, Bui Cong Que, Nguyen Quang Minh. Study of relationship between the present-day regional stress field with fault's geometric parameters determining the relative displacement of the Earth's crust in the South China Sea and adjacent areas // *Russian J. Pacific Geol.* 2017. V. 36, N 2. P. 93–105.
  56. Tran Tuan Dung, R. G. Kulinich, Nguyen Van Sang, Bui Cong Que, Nguyen Ba Dai, Nguyen Kim Dung, Tran Tuan Duong, Tran Trong Lap. Improving accuracy of altimeter-derived marine gravity anomalies for geological structure research in the Vietnam South-Central continental shelf and adjacent areas // *Russian J. Pacific Geol.* 2019. V. 13, N 4. P. 364–374.
  57. Tran Tuan Dung et al. Investigation and evaluation of Late Quaternary geology- sediment characteristics related to erosion and accretion in the coastal area of Thai Binh-Quang Ninh / Project under the Basic Investigation Tasks. 2021. Code: UQĐTTCB.02/21-22.
  58. Vietnam oil and gas corporation. *Geol. and Petrol. Resources of Vietnam,* 2012. 745 p.
  59. Wallace R.E. Geometry of shearing stress and relation to faulting // *J. Geol.* 1951. V. 59. P. 118–130.
  60. Worum G., Van Wees J.-D., Bada G., Van Balen R.T., Cloetingh S., Pagnier H. Slip tendency analysis as a tool to constrain fault reactivation: A numerical approach applied to three-dimensional fault models in the Roer Valley rift system (southeast Netherlands) // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109. B02401. DOI:10.1029/2003JB002586
  61. Yu, S.-B., Chen, H.Y., Kuo, L.-C. Velocity field of GPS stations in the Taiwan area // *Tectonophysics.* V. 274. P. 41–59.
  62. Yukutake Y., Takeda T., Yoshida A. The applicability of frictional reactivation theory to active faults in Japan based on slip tendency analysis // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2015. V. 411. P. 188–198.
  63. Zoback M.L. First- and second-order patterns of stress in the lithosphere: the world stress map project // *J. Geophys. Res.* 1992. V. 97. P. 11703–11728.

Рекомендована к печати В.Б. Каплуном

после доработки 10.06.2021 г.

принята к печати 21.07.2021 г.



***Tran Tuan Dung, R.G. Kulinich, Nguyen Quang Minh, Nguyen Van Sang, Tran Tuan Duong, Nguyen Trung Thanh, Nguyen Ba Dai, Tran Trong Lap, Nguyen Kim Dung, Dang Xuan Tung, Dao Dinh Cham, Nguyen Thai Son***

**Study on reactivation possibility of the faults system in the western part of the South China Sea as a source of geological hazards**

The article summarizes the results of research aimed at study the possible reactivation of the fault system in the Earth's crust of the South China Sea with likely dangerous consequences for the coastal area of Vietnam. The research was carried out over several years with the publication of interim results. The solution to this problem required the determination of the regional stress field in the Earth's crust. Analysis of the focal mechanisms of local earthquakes, as well as the structural characteristics of faults, obtained by gravity and seismic data, was used for this. The possibility of renewal of fault activity was determined by the inversed-stress method in the calculated regional stress field. The parameters of the present-day stress field were used to estimate the required slip force along the pre-existing faults. To assess the probability of reactivation of the entire system of faults, the possibility of horizontal and vertical structural (block) displacements in the Earth's crust of the study area was calculated. Based on a comprehensive analysis of the data obtained, a forecast was made of the probability of reactivation of the fault system in the South China Sea region. This can be the cause of earthquakes, underwater landslides and other geological hazards in the coastal area of Vietnam.

***Key words:* fault system, earthquake's focal mechanisms, regional stress field, gravity and seismic data, forecast of reactivation probability of faults, the South China Sea.**