

УДК: 550.34

## ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКОЕ РАЙОНИРОВАНИЕ СЕЙСМОГЕННЫХ РАЗЛОМОВ ВОСТОЧНОЙ АНАТОЛИИ И КАРАМАНМАРАШСКИЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 06.02.2023 г.

© 2023 г. Ю. Л. Ребецкий\*

*Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия*

*\*E-mail: reb@ifz.ru*

Поступила в редакцию 15.05.2023 г.

После доработки 08.06.2023 г.

Принята к публикации 13.06.2023 г.

Результаты тектонофизической реконструкции напряжений в коре Восточной Анатолии, полученные из анализа данных о механизмах очагов землетрясений, показали, что здесь за последние 20 лет произошла существенная перестройка напряженного состояния. Она была в основном сконцентрирована в южном и юго-западном секторах региона, захватив области в сотни километров вдоль Восточно-Анатолийского разлома. Полученные по результатам тектонофизического мониторинга данные не только об ориентации главных напряжений, но и о нормированных их значениях дали возможность рассчитать кулоновы напряжения на разломах. Результаты районирования разломов по интенсивности и знаку этих напряжений позволили выявить как опасные участки, близкие к предельному состоянию, так и безопасные с отрицательными значениями кулоновых напряжений. Установлено, что в области очага первого сильного Пазарджыкского землетрясения, имевшего сложное строение (три сегмента), существовали протяженные участки критически высокого уровня кулоновых напряжений, разделенные зонами низких и даже отрицательных их значений. При этом эпицентр этого землетрясения располагался на оперяющем разломе в пределах участка (первый сегмент) высокого уровня кулоновых напряжений. Очаг второго сильного Эльбистанского землетрясения находился на разломе, для которого кулоновы напряжения были отрицательные. Выполненный анализ показывает, что это второе Турецкое землетрясение могло быть вызвано изменениями напряжений, которые произошли в коре региона после первого сильного землетрясения. Результаты исследований показывают, что кулоновы напряжения в системах близко расположенных и разноориентированных разломов могут быть подвержены резким изменениям в процессе развития землетрясения на одном из опасных участков.

*Ключевые слова:* активные разломы, очаг землетрясения, кулоновы напряжения, тектонофизическое районирование.

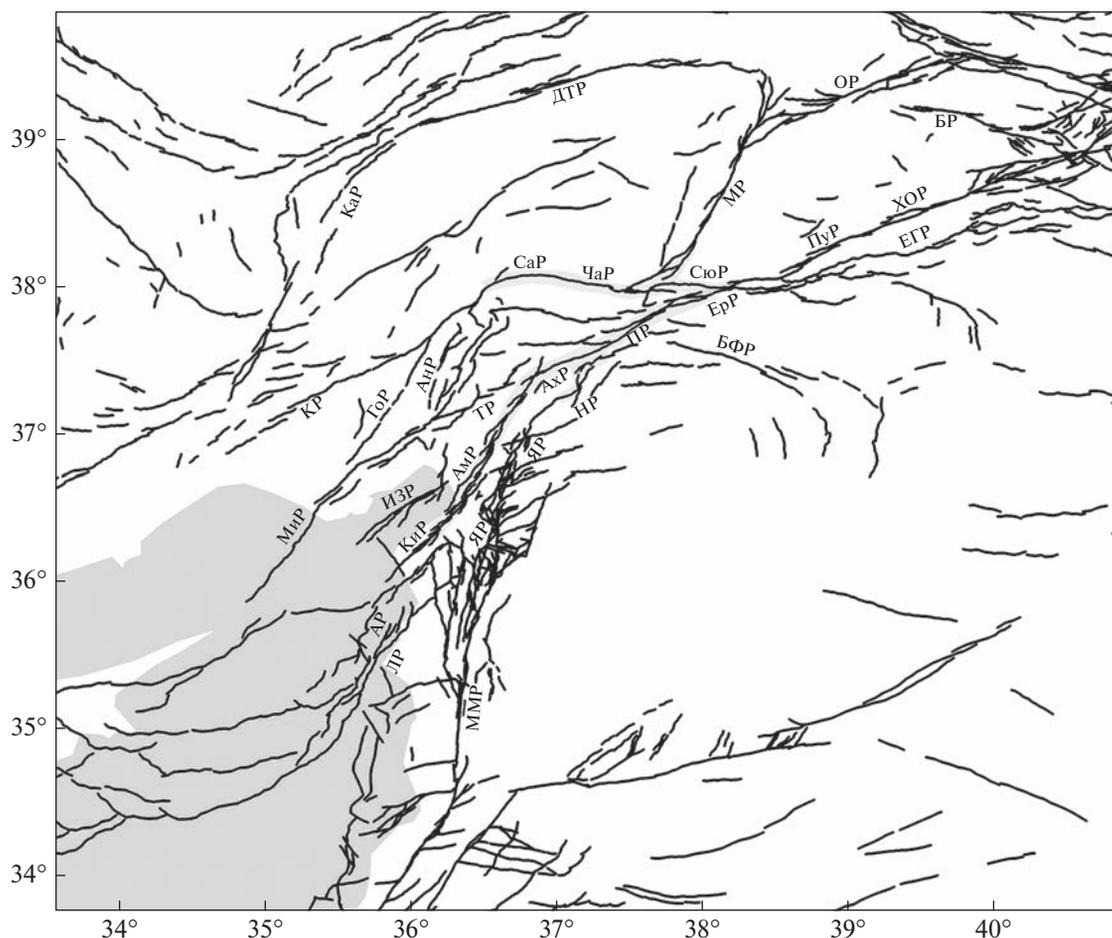
**DOI:** 10.31857/S0002333723060170, **EDN:** NGEYTL

### ВВЕДЕНИЕ

Турецкие землетрясения в провинции Караманмараш (Kahramanmaraş) произошли 06.02.2023 г. на Восточно-Анатолийской региональной системе разломов, которая, протягиваясь с северо-востока на юго-запад, разделяет Аравийскую и Анатолийскую микроплиты [Allen, 1969; Duman, Emre, 2013]. В средней своей части Восточно-Анатолийская зона разломов (ВАЗР) расходится на несколько основных ветвей и в виде “конского хвоста” расширяется на запад и восток (рис. 1). Первое из двух сильных Караманмарашских землетрясений – Пазарджыкское землетрясение с  $M_w = 7.8$  (<https://earthquake.usgs.gov>) – произошло на глубине 10 км к северу от города Газиантеп (Gaziantep) и имело протяженность около 350 км. Оно началось не на основной ветви ВАЗР, а южнее, на

оперяющем разломе Нарли (Narlı), затем пошло на северо-восток по основной ветви ВАЗР (разлом Пазарджык) и на юго-запад по одному из восточных ответвлений ВАЗР (разлом Амэнос), начинающемуся вблизи г. Туркоглы. На этой части ВАЗР, согласно историческим данным, имела место брешь в сильных землетрясениях с магнитудой более 7.5 [Sunbul, 2019].

Очаг второго, Эльбистанского землетрясения с  $M_w = 7.5$  (<https://earthquake.usgs.gov>), произошедшего через 9 часов после первого вблизи г. Эльбистан, был расположен на наиболее западной ветви ВАЗР, которая после города Челихан (Çelikhan) с субширотным простиранием с востока на запад идет по системе разломов Сюрдю–Гоксун–Мисис (Sürgü–Goksun–Misis).



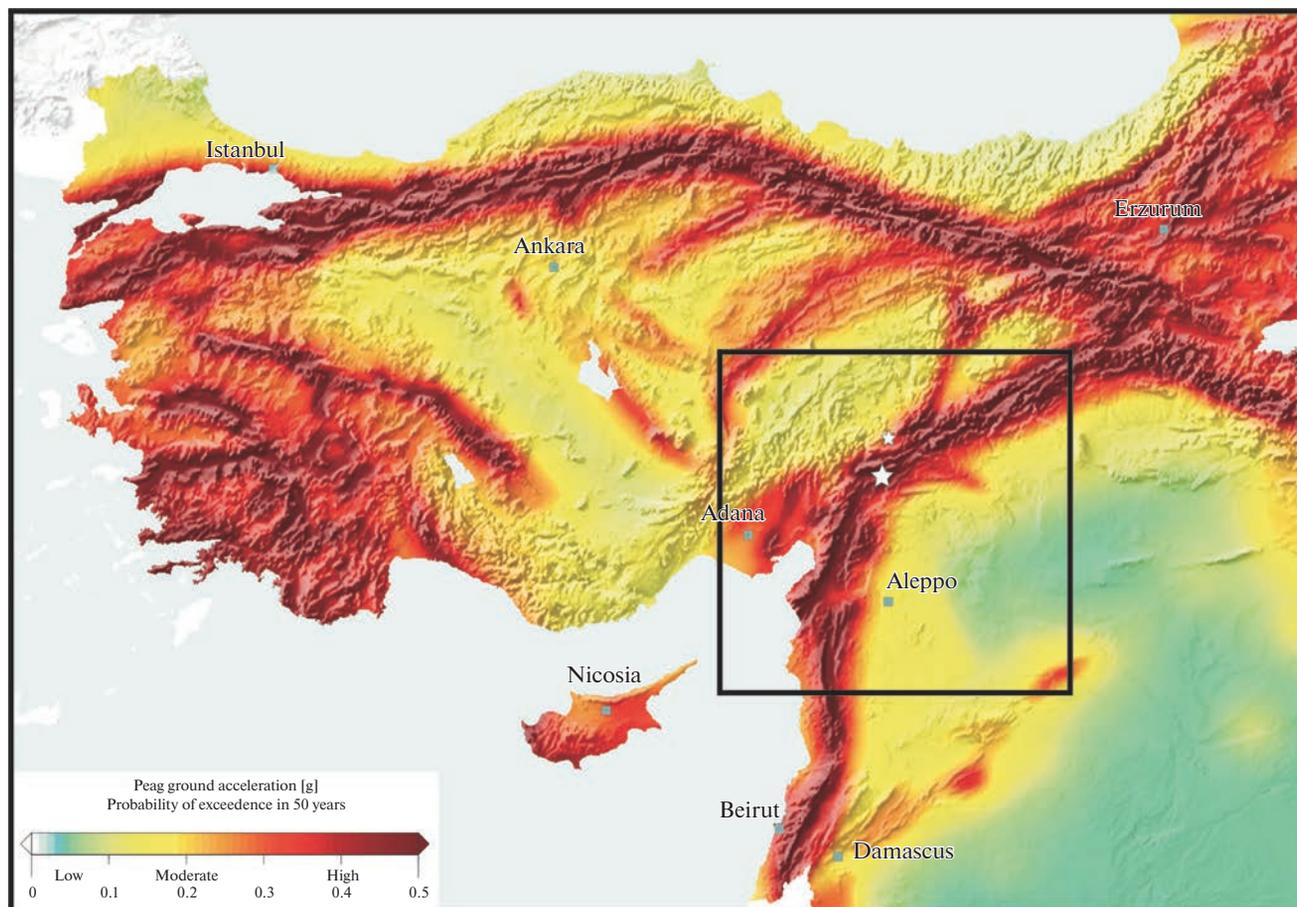
**Рис. 1.** Карта разломов Восточной Анатолии, проявивших свою активность за неотектонический период времени. Положение разломов согласно базе данных активных разломов Евразии [Бачманов и др., 2017]: ДТР – Делялер Тесегер (Deliler Tescger); МР – Малагия (Malatya); Сюр – Сюрю (Sürgü); ЧаР – Чардак (Çardak); СаР – Саврун (Savrun); КР – Козан (Kozan); МиР – Мисис (Misis); ЛР – Латакия (Latakia); ММР – Мертвого Моря (Dead Sea); ИЗР – Искандерунский Залив (Iskenderun Bay); КиР – Кирикхан (Kirikhan); АмР – Амэнос (Amanos); ТР – Туркоглы (Turkoglu); ПР – Пазарджык (Pazarcik); АхР – Ахирдаг (Ahirdag); АнР – Андирум (Andirun); ГоР – Гоксун (Goksun); КаР – Кайсери (Kayseri); ОР – Овасик (Ovasik); БР – Бингол (Bingol); БФР – Бозова Фая (Bozova Fay); ЕГР – Ергани Гунгус (Ergani Gungus); Пур – Путудже (Pütürge); ХОР – Хазар Озеро (Hazar Lake); НР – Нарли (Narli); Яр – Ясемек (Yesemek). Полосы серой заливкой отвечают расположению сейсмогенных участков разрывов для двух сильнейших Караманмарашских землетрясений.

Согласно работе [Reilinger et al., 2006] движение литосферных плит определяет вдоль ВАЗР левосторонний сдвиг со скоростью  $10 \pm 1$  мм/год. Исследования, приведенные в работе [Trifonov et al., 2018], показывают, что смещение реки Евфрат на 12 км с середины четвертичного периода соответствует средней геологической скорости скольжения 12–15 мм/год. Эти движения определили возникновение здесь множества слабых и частых землетрясений в верхней части земной коры до глубин 20–25 км [Taumaz et al., 1991; 2021; Melgar et al., 2020], а также достаточно большого количество разрушительных землетрясений за последние 2000 лет. Имеются исторические данные о более 20 землетрясениях с  $M \geq 6.1$ , произо-

шедших вдоль ВАЗР только с 1822 по 2023 гг. [Sunbul, 2019; Chen et al., 2023].

На картах сейсмической опасности Турции (рис. 2) [Giardini et al., 2018; Baltzopoulos et al., 2023] ВАЗР определяется как область наибольших ускорений. При этом субширотному участку ветви ВАЗР, проходящему через разлом Сюрю, отвечают прогнозные ускорения среднего уровня. Это позволяет предположить, что Пазарджыкское землетрясение является не просто триггером для Эльбистанского землетрясения, а главным фактором, создавшим условия для возникновения второго сильного землетрясения [Тихоцкий и др., 2023].

Отсутствие предпосылок для столь мощного землетрясения на участке западной ветви ВАЗР,



**Рис. 2.** Карта сейсмической опасности Турции в виде ожидаемых максимальных ускорений земной поверхности при землетрясении. Звездочки — эпицентры двух сильнейших землетрясений в провинции Караманмараш 06.02.2023 г. Рисунок из работы [Giardini et al., 2018] с дополнениями.

которое следовало из результатов анализа ранее происходивших здесь землетрясений, показало возможность очень быстрого изменения напряженного состояния земной коры. Хотя после Караманмарашских землетрясений прошло менее полугода, но уже вышло и выходит целый ряд публикаций, в которых обсуждаются вопросы неоднородности напряженного состояния коры в этой области и возможная роль как постепенного, так быстрого изменения напряженного состояния, приводящего к повышению сейсмической опасности в зонах со сложной геометрией разломов [Okuwaki et al., 2023; Kwiatek, et al., 2023; Güvercin et al., 2023]. Далее в статье будет показано, что существенные изменения напряженного состояния в Восточной Анатолии происходили в течение последних 20–30 лет. Можно полагать, что именно эти изменения напряжений определили подготовку катастрофически сильного по последствиям Пазарджыкского землетрясения.

На карте сейсмической опасности Турции (рис. 2) зона двух произошедших сильных землетрясений общей протяженностью более 500 км

занимает менее 5% от протяженности всех наиболее сейсмически опасных разломов. Наличие большой общей протяженности опасных разломов, расположенных в областях высокой плотности населения, не позволяет эффективно проводить опережающие профилактические ремонтно-строительные работы по предупреждению последствий землетрясений. Необходима разработка методов выделения разломов повышенной сейсмической опасности на ближайший период в 3–5 лет. Подобное районирование разломов по степени их опасности должно отличаться от методики прогноза сильных землетрясений.

При прогнозе землетрясений изучаются корреляционные связи между совокупностью землетрясений, не обязательно привязанных к конкретному разлому [Соболев, 1993; Kossobokov, 2006; 2007; Завьялов, 2006; Davis et al., 2012] происходящими на достаточно больших площадях (масштаб прогнозируемого землетрясения). Такой подход определяет все разломы соответствующего масштаба, находящиеся в зоне прогнозируемого землетрясения, одинаково опасными. На

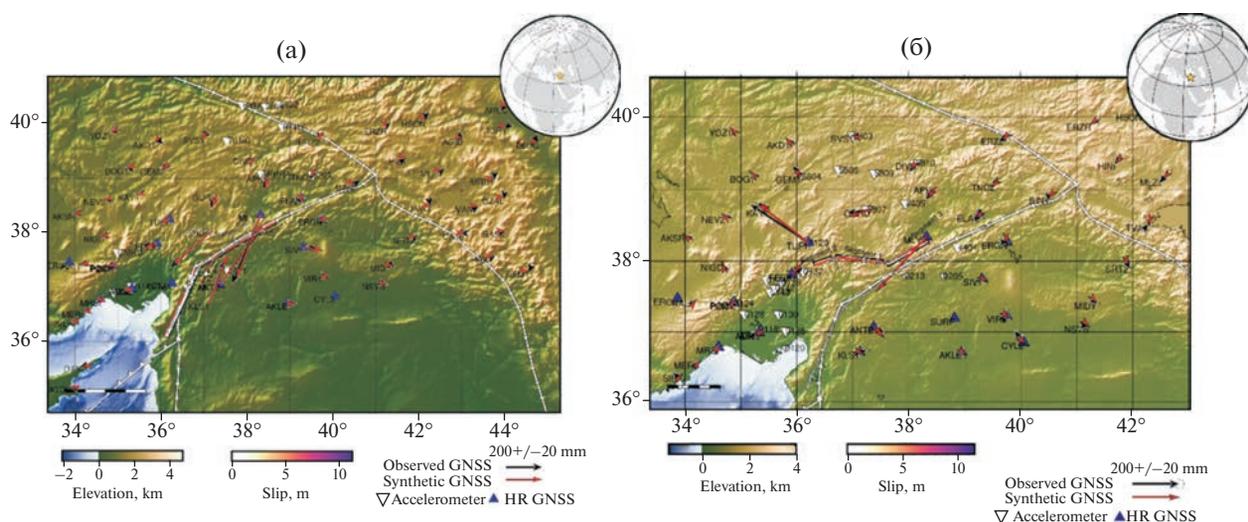


Рис. 3. Сейсмогенерирующие сегменты очагов сильнейших землетрясений провинции Караманмараш, произошедших 06.02.2023 г., и косейсмические смещения в пунктах постоянных GPS-наблюдений по данным Геологической Службы США (<https://earthquake.usgs.gov>). Рисунки с сайта GS USA (01.06.2023 г.)

самом деле, разные участки разломов имеют разную степень готовности реализовать хрупкое разрушение. Вполне очевидно, что рождение землетрясения определяется сочетанием большого числа факторов, приводящих к тому, что на каком-то разломе появляется участок, где уровень касательных напряжений близок к прочности. Это может происходить как за счет повышения величины касательных напряжений [Reid, 1910], так и за счет понижения прочности разлома [Richter, 1958], например, за счет повышения флюидного давления в трещинно-поровом пространстве зоны разлома или понижения сжатия, нормального к разлому.

Наши исследования [Ребецкий, Кузиков, 2016; Ребецкий, 2018; Rebetsky, Guo, 2021] показывают, что такие участки разломов, состояния которых близко к *предельному*, могут располагаться вдоль разлома прерывисто. Их иногда разделяют участки разломов, где уровень касательных напряжений существенно меньше прочности разлома — *стабильное состояние*, которые можно рассматривать как препятствие для развития хрупкого разрушения — *барьер*. Из-за наличия таких барьеров каждый из участков предельного состояния может породить землетрясение не самой большой для региона магнитуды (например,  $M_w < 6.0$ ). Но в каких-то случаях сочетание параметров таких участков (их близость друг к другу, протяженность каждого, уровень снимаемых напряжений) приводит к тому, что землетрясение, возникшее на каком-то участке с протяженностью, отвечающей магнитуде 6.0, не останавливается на таком барьере, а преодолевает участок разлома со стабильным состоянием. Таким образом, возникает возможность суммирования

участков предельных состояний и формирования сильного землетрясения, протяженностью и магнитудой, превышающей стандартно возникающие на разломе землетрясения.

Изложенные выше обобщения тектонофизических исследований опасных разломов хорошо согласуются с характером развития очагов двух сильных турецких землетрясений. Согласно данным, размещенным на сайте Геологической службы США (<https://earthquake.usgs.gov>), первое из них — Пазарджыкское землетрясение началось не на главной ветви ВАР, а на сопряженном с ним опережающем разрыве протяженностью около 50 км (сегмент 1 на рис. 3а). Вероятно, те изменения напряжений, которые он спровоцировал на главной ветви ВАЗР, стали триггером и вместо землетрясения с магнитудой около 7 произошло землетрясение почти на порядок большей интенсивности по выделившейся энергии.

Простираения сейсмогенерирующих разрывов первого и третьего сегментов были близки и отличались от простираения второго сегмента на угол около  $45^\circ$  [Okuwaki et al., 2023; Kwiatek et al., 2023], что может способствовать возникновению нестабильности на ранее стабильных разломах. Вдоль всех трех сегментов очага реализованы горизонтальные компоненты смещения в виде левого сдвига. Наибольшие сотрясения поверхности, наблюдавшиеся при этом землетрясении, располагались вдоль третьего сейсмогенерирующего сегмента его очага (<https://earthquake.usgs.gov>). В турецкой провинции Хатай, в которой располагалась южная, концевая часть этого сегмента очага, в восточном его крыле, вблизи села Тепехан (36.158299 с.ш., 36.230053 в.д.) в районе оливковой рощи возник громадный 30-метровый провал

поверхности протяженностью в несколько километров. В работе [Taftoglou et al., 2023] на основе данных дистанционного зондирования земной поверхности выявлены участки с признаками разжижения грунта, которые приурочены к концевым зонам сейсмогенного разрыва и участкам резкой смены его простирания. Все это свидетельствует о масштабных изменениях напряженного состояния.

Также три сейсмогенерирующих сегмента были выделены в очаге второго, Эльбистанского землетрясения (<https://earthquake.usgs.gov>), располагавшиеся на разломах Сюрдю, Чардак и Саврун самой западной ветви ВЗР [Barbot et al., 2023]. Эпицентр этого землетрясения находился в срединной части очага – сегмент 1 (см. рис. 3б). При этом первые два сегмента очага находились на участке разлома с простиранием, резко отличающимся от простирания восточной ветви ВЗР (около 60°). Третий сейсмогенерирующий сегмент очага этого землетрясения располагался на разломе, ответвляющемся от субширотного разлома Чардак на северо-восток, т.е. с простиранием фактически параллельным основной ветви ВЗР. Таким образом, очаг Эльбистанского землетрясения сформировался в западном крыле северного – концевого участка второго сейсмогенерирующего сегмента очага Пазарджикского землетрясения, что могло способствовать изменению напряженного состояния на близко расположенных разломах Сюрдю, Чардак.

Произошедшие в Турции сильнейшие за последнее столетие землетрясения поставили ряд вопросов: 1). Первый сегмент очага Пазарджикского землетрясения не являлся прямым продолжением двух других сегментов. Какое взаимоотношение имело место между первым сегментом и двумя другими сегментами? Могло ли реализоваться землетрясение такой же силы без старта с первого сегмента? 2). Могло ли произойти Эльбистанское землетрясение без возникновения Пазарджикского землетрясения? 3). Можно ли было заранее сказать, что здесь готовится землетрясение такой энергетической мощности? 4). Существовали ли какие-то данные, которые могли бы указать на опасность конкретных разломных зон в области будущих очагов сильнейших землетрясений?

### ПРОБЛЕМЫ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ

С позиции геомеханики разлом, регулярно проявляющий себя в сейсмичности, находится вблизи предельного напряженного состояния. Существуют разные подходы к объяснению возможности возникновения на таком разломе сильного землетрясения с уровнем выделившейся энергии, на порядок превышающем предыдущие

землетрясения, происходившие здесь длительный период времени [Rice, 1982; Кочарян, 2017]. В них такой переход от среднесильных и слабых землетрясений к очень сильному землетрясению связывается с особенностями медленного скольжения на разломах, реализующихся при упруго-хрупко-пластическом деформировании геосреды. Пока эти геомеханические теории, базирующиеся на изучении предельного напряженного состояния в коре, не дают нам руководящих правил, которые позволили бы сформулировать концепцию детерминированного прогноза для возникновения сильных землетрясений.

С другой стороны, сами геомеханические критерии хрупкого разрушения подсказывают нам разницу в напряженном состоянии между слабым и сильным землетрясением – это протяженность участка предельного напряженного состояния. Конечно, все не так просто, как это представлялось 50–70 лет назад, когда под областью, опасной для возникновения сильного землетрясения, понимали зону разлома с высоким уровнем напряжений [Гзовский, Белоусов, 1954; Гзовский, 1954; 1956; 1957; Добровольский, 1991]. Оказалось, что важен уровень не только касательных напряжений, сдвигающих борта разлома, но и уровень силы трения на нем, возрастающий при высоком уровне нормальных к разлому напряжений [Ребецкий, 2003]. Поэтому правильнее говорить не о высоком уровне напряжений, а о предельном напряженном состоянии с высоким уровнем касательных напряжений по отношению к нормальным напряжениям, определяющим уровень трения на разломе. Их соотношение характеризуется значением кулоновых напряжений.

В силу всего этого общие соображения подсказывают нам, что для детерминированного прогноза необходимо выполнить районирование разломов по степени близости отдельных их участков к предельному напряженному состоянию по уровню кулоновых напряжений и затем по протяженности таких участков сделать вывод о магнитудах готовящихся землетрясений.

Следует согласиться, что эта задача совершенно иная, чем та, которая ставится в теории прогноза сильных землетрясений. Решение такой задачи невозможно чисто статистическими и математическими методами, а требует привлечения либо методов геомеханики – математическое моделирование напряжений в коре и на разломах [Гарагаш, 2006; Макаров и др., 2007; Стефанов, Бакеев, 2015], либо методов тектонофизики – изучения напряжений непосредственно в природном объекте [Ребецкий, 2003]. Далее в работе будут обсуждаться вопросы районирования опасных разломов в режиме тектонофизического мониторинга напряженного состояния земной коры.

В настоящее время первичными данными для оценки сейсмического риска территорий являются данные о силе (энергетическом уровне) и о положении эпицентров ранее произошедших землетрясений, которые могут быть получены как инструментальными сейсмологическими методами, так и сейсмотектоническими методами, опирающимися на геологические, инженерно-геологические, историко-археологические, дендрохронологические и радиоуглеродные принципы датирования палеосейсмогенных деформаций. Такие методы прогноза используют принцип, аналогичный принципу актуализма, только с изменением последовательности во времени фактических данных и прогнозируемого события. Возможную магнитуду будущего сильного землетрясения участка земной коры определяют магнитудой ранее произошедшего здесь наиболее сильного землетрясения.

При этом существуют два главных подхода в выявлении опасности возникновения сильных землетрясений:

1. Разработка карт сейсмического районирования, базирующихся на анализе данных о сейсмотектонических проявлениях на поверхности в областях ранее произошедших сильнейших землетрясений региона (палео, исторические и современные).

В рамках этого подхода создаются карты интенсивности сотрясаемости земной поверхности в баллах (ожидаемые ускорения), на основе которых согласно Строительным нормам и правилам (СНиП) определяются специальные требования к расчету и коэффициенты увеличения нагрузок, используемые при проектировании промышленных и гражданских объектов. Периодические пересмотры таких карт (раз в 10–30 лет) приводят к постепенному увеличению на них площади красного цвета, характеризующего наиболее опасные участки территорий и сейсмогенных разломов. Это происходит за счет увеличения современного, инструментального периода наблюдения, а также из-за появления новой информации о сильных палеоземлетрясениях далекого прошлого, получаемых сейсмотектониками в полевых наблюдениях. Эти новые данные позволяют не только выявить наиболее сильные землетрясения, произошедшие в исследуемом регионе, но и установить/уточнить период повторяемости сильных землетрясений. При этом на картах сейсмического районирования отсутствует информация, на основе которой можно понять, к какой эпохе, повышенной или пониженной сейсмической опасности, относится сегодняшний период. В то же время имеются свидетельства существенной флуктуации сейсмического процесса во времени [Гусев, Шумилина, 2004].

Следует заметить, что на этом же принципе актуализма построена и система прогноза мест ка-

тастрофически сильных землетрясений для северного фланга Тихоокеанской субдукционной области, разработанная академиком С.А. Федотовым [Федотов, 1968; 2005; Федотов, Соломатин, 2017]. В рамках этого подхода фактически считается, что накапливаемая упругая энергия приблизительно равномерно распределена вдоль границ плит и наиболее эффективно может высвободиться только в результате сильных землетрясений. В соответствии с такой концепцией выделяются области сейсмических брешей первого рода, где землетрясения с магнитудой более 7.7 не наблюдались длительное время. С конца 70-х годов прошлого века действует прогноз сильного землетрясения вблизи Авачинской бухты. За эти более 40 лет произошло много землетрясений с соответствующей и даже большей магнитудой в других зонах Курильских островов и Японии (Кунаширское в 1994 г., Токачи-Оки в 2003 г., Среднекурильские в 2007 и 2008 гг., Тохоку в 2011 г.), а прогноз Авачинского землетрясения так и не был реализован.

2. Прогноз места, времени и магнитуды будущего сильного землетрясения на основе инструментальных данных о землетрясениях и/или по данным различных предвестников.

Рассматриваются три этапа прогноза: долгосрочный, определяющий место и силу землетрясения; среднесрочный, уточняющий место и силу и определяющий время землетрясения – недели, месяцы; краткосрочный, определяющий время события – часы, дни. В этом подходе существуют статистически значимые пропуски сильных землетрясений, ложные – нереализованные прогнозы, а также возможности снятия прогноза в случае, если землетрясение долго не происходит. Такой подход не получил широкого внедрения в практику государственного обеспечения безопасности жизни людей и сохранения промышленных и гражданских объектов в сейсмоактивных зонах. При этом в отдельных регионах уже существует налаженная система взаимосвязи сейсмологических групп с органами местной власти в виде регулярно предоставляемых отчетов о наблюдаемой сейсмической активности и рисков ее повышения (Камчатка, Байкал). В ИТПЗ РАН разработан и уже длительное время функционирует алгоритм глобального прогноза сильных землетрясений с магнитудами более 7.5 [Ismail-Zadeh, Kossobokov, 2020].

Важно отметить, что карты сейсмического районирования [Уломов, 1999; Уломов, Шумилина, 1999] опираются на сейсмогенные разрывы, на которых наблюдались сильнейшие землетрясения. В то же время при прогнозе землетрясений в том виде, как он реализован практически во всех подходах, разрывы не имеют принципиального значения, поскольку основным источником

данных являются землетрясения малой и средней интенсивности, которые могут происходить на достаточно большой площади и не привязаны к какой-то одной системе разрывов. Такая система анализа фактически определяет, что имеет место не предельное напряженное состояние участка разлома, а выявляются большие объемы земной коры, которые определяются как подошедшие к пределу энергонасыщения. В результате таких прогнозов их авторы иногда даже не могут точно сказать, на каком разрыве произойдет землетрясение. Поэтому наличие даже долгосрочного прогноза сильного землетрясения не позволяет оценить заранее зоны, которые будут подвергаться высокой интенсивности сотрясения – высоким ускорениям.

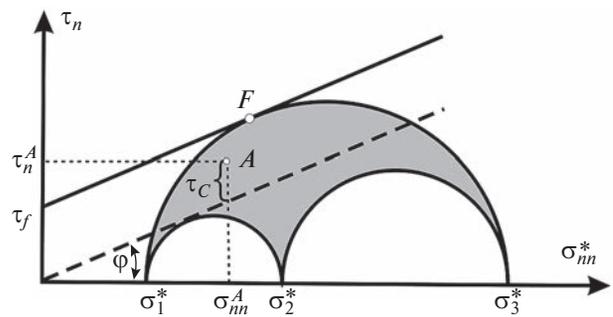
### О ВОЗМОЖНОСТЯХ ОЦЕНКИ КУЛОНОВЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА РАЗЛОМАХ В ЗЕМНОЙ КОРЕ

В геомеханике [Николаевский, 2010а; 2010б; 2012] под кулоновыми напряжениями ( $\tau_C$ ) понимается разница между касательными напряжениями ( $\tau_n$ ), действующими на разрыве, и напряжениями сил трения, вызываемыми нормальными к разрыву напряжениями ( $\sigma_{nn}$ ), при учете разрушающей роли флюидного давления в трещинах и порах ( $p_{fl}$ ). Рост уровня кулоновых напряжений до положительных значений характеризует приближение напряженного состояния к критическому, определяющему возможность хрупкого разрушения пород:

$$\begin{aligned} \tau_C &= \tau_n + k_f \sigma_{nn}^* \leq \tau_f, \\ \sigma_{nn}^* &= \sigma_{nn} + p_{fl} < 0. \end{aligned} \quad (1)$$

где  $k_f = \text{tg}\varphi$  – коэффициент внутреннего трения ( $\varphi$  – угол внутреннего трения),  $\tau_f$  – прочность внутреннего сцепления, а  $\sigma_{nn}^*$  – эффективное нормальное сжимающее напряжение, уменьшенное на величину флюидного давления. Равенство в выражении (1) выполняется для трещин скалывания с максимальной прочностью ( $\tau_f - k_f \sigma_{nn}^*$ ). Здесь и далее используется правило знаков, принятое в механике сплошной среды – напряжение растяжения положительное.

Эксперименты на образцах показывают зависимость  $k_f$  и  $\tau_f$  от напряжений. В тектонофизике [Ребецкий, 2003а] в связи с большими масштабами усреднения напряжений и невозможностью получения реальных данных о прочности больших массивов трещиноватых пород зависимость параметров прочности от напряжений пренебрегают, полагая  $k_f$  и  $\tau_f$  постоянными и счи-



**Рис. 4.** Графическая схема определения кулоновых напряжений на диаграмме Мора с большим кругом Мора, касающимся внешней огибающей в виде прямой линии предела прочности – предельное состояние. По вертикали – касательные напряжения, по горизонтали – эффективные нормальные напряжения (направо откладываются отрицательные значения нормальных напряжений). Пунктирная линия – минимальная прочность трения для разрывов,  $\sigma_i^*$  ( $i = 1, 2, 3$ ) – эффективные главные напряжения, области серой заливки определяют нормальные и касательные напряжения на произвольно ориентированной плоскости для данного напряженного состояния. Фигурной скобкой показано значение кулоновых напряжений для напряженного состояния  $A$  на разрыве.

тая, что коэффициент внутреннего трения равен коэффициенту трения на разрывах (рис. 4).

После работы [Stein et al., 1992; King et al., 1994; Harris et al., 1995] для выявления зон повышенной сейсмической активности стали применять районирование участков разломов по приращениям кулоновых напряжений  $\Delta\tau_C$ , возникающим из-за изменения уровня напряжений в результате сильного землетрясения, произошедшего в исследуемом регионе. Подобные расчеты, как правило, опирались на упругую модель трещины сдвига, которая отвечала возникшему очагу землетрясения. Первоначально аналитические или численные расчеты выполнялись для территорий, где имел место геодинамический режим напряженного состояния горизонтального сдвига – район разлома Сан-Андреас (США) [King et al., 1994; Mallman, Zoback, 2007], позднее подобный подход был распространен и на участки коры с другими режимами (горизонтальное сжатие или растяжение) [Ganas et al., 2006].

$$\begin{aligned} \Delta\tau_C &= \Delta\tau_n + k_f \Delta\sigma_{nn}^*, \\ \Delta\sigma_{nn}^* &= \Delta\sigma_{nn} + \Delta p_{fl} < 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь  $\Delta\tau_n$  и  $\Delta\sigma_{nn}$  – приращения касательных и нормальных на разрыве напряжений, а  $\Delta p_{fl}$  – приращение флюидного давления. Положительное значение  $\Delta\tau_n$  и  $\Delta p_{fl}$  определяет увеличение

уровня касательных напряжений на плоскости разлома и флюидного давления в трещинно-поровом пространстве пород, а отрицательные значения  $\Delta\sigma_{nn}$  отвечают увеличению уровня напряжений сжатия, нормальных к разлому.

Для расчета изменений кулоновых напряжений необходимо сформулировать краевые условия нагружения исследуемого участка коры и задать строение (разрывы) и свойства среды. Для зон сдвига, как правило, задается направление действия напряжений наибольшего горизонтального сжатия, его соотношение с минимальным горизонтальным сжимающим напряжением и коэффициент трения на сейсмогенном разрыве.

Отметим, что в задаче о трещине сдвига (мех.) среда представляет собой упругое однофазное твердое тело и поэтому отсутствует возможность расчета изменений флюидного давления. В этой связи в расчетах приращений кулоновых напряжений фактически считается, что до и после сильного землетрясения флюидное давление в породах не изменяется,  $\Delta p_f = 0$ , что является сильным упрощением реального природного процесса.

Предложенный в работе [Stein et al., 1992] подход первоначально применялся для обоснования проявления повышенной плотности афтершоков именно в участках коры, для которых были получены положительные значения приращений кулоновых напряжений. В последнее время этот же подход стал использоваться и для обоснования миграции сильных землетрясений вдоль разломных зон [Pang, 2022]. Следует отметить, что для ВАР в работах [Sunbul, 2019; Chen et al., 2023] соответственно до и после Караманмарашских землетрясений исследовались изменения кулоновых напряжений по данным о серии около 20 исторических землетрясений.

Параллельно с этим направлением, развиваемым в сейсмологии, в нефтяной геофизике стали использовать отношение касательных напряжений на разрывах к модулю эффективных нормальных напряжений [Morris et al., 1996]:

$$T_d = \frac{\tau_n}{|\Delta\sigma_{nn}^*|}, \quad (3)$$

которое, определили как тенденцию к скольжению разрывов (*slip tendency*), поскольку рост значений  $T_d$  действительно определяет увеличение уровня кулоновых напряжений (1). В дальнейшем параметр  $T_d$  стали связывать со способностью пород к проявлению дилатансии [Ferrill, Morris, 2003].

Сейчас расчет параметра  $T_d$  входит в стандарт МАГАТЭ при оценке опасности разрывов, выделенных на площадках строительства АС. В качестве примера можно привести АС Ханхикиви-1 в Финляндии, для которой такие работы выполня-

лись в 2018–2019 гг. При этом в качестве исходных данных были использованы замеры напряжений ин-ситу, полученные в горном деле [Kivinen, Varis, 2009; Pohjatekniikka, 2018a; 2018b; 2018в; Technical report ..., 2018].

В работах [Ребецкий, Кузиков, 2016; Ребецкий и др., 2021] показана возможность выполнять районирование опасных участков разломов на основе результатов тектонофизической реконструкции напряжений в природном объекте. Источником данных для реконструкции напряжений являются сейсмологические или геологические индикаторы разрывных деформаций. Эти данные должны дополняться информацией о положении и геометрии разломов, выделяемых геологическими методами как активные на неотектоническом этапе. Указанная совокупность исходных данных позволяет рассчитывать кулоновы напряжения на поверхности разлома, по абсолютным или относительным значениям которых можно районировать участки разломов разной степени опасности. Этот подход к оценке сейсмического риска следует рассматривать как детерминистический, который позволяет выполнять мониторинг состояния активных разломов, выделяя для разных их участков разный магнитудный уровень ожидаемых сильных землетрясений. В настоящей работе тектонофизический подход был использован для районирования разломов по степени их опасности.

## ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКИЙ ПОДХОД В ОЦЕНКЕ КУЛОНОВЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Как следует из выше представленного анализа, для расчета кулоновых напряжений необходимы данные о касательных ( $\tau_n$ ) и нормальных ( $\sigma_{nn}$ ) напряжениях на участках разломов. Для получения этих напряжений недостаточно наличия данных об ориентации осей главных напряжений ( $\sigma_i$ ,  $i = 1, 2, 3$ ) и соотношения их величин, характеризующих коэффициентом Лодэ–Надаи ( $\mu_\sigma$ ). Для определения напряжений на участках разломов кроме них также необходимо знать максимальные касательные напряжения  $\tau$  и всестороннее тектоническое давление  $p$ :

$$\begin{aligned} \tau_n &= \tau \tilde{\tau}_n \quad \text{при} \quad \tilde{\tau}_n = \left(1 - \frac{\mu_\sigma}{3}\right) l_{n1} l_{s1} + \\ &+ \left(\frac{2\mu_\sigma}{3}\right) l_{n2} l_{s2} - \left(1 + \frac{\mu_\sigma}{3}\right) l_{n3} l_{s3}, \\ \sigma_{nn} &= -p + \tau \tilde{\sigma}_{nn} \quad \text{при} \quad \tilde{\sigma}_{nn} = \left(1 - \frac{\mu_\sigma}{3}\right) l_{n1} l_{n1} +, \\ &+ \left(\frac{2\mu_\sigma}{3}\right) l_{n2} l_{n2} - \left(1 + \frac{\mu_\sigma}{3}\right) l_{n3} l_{n3}, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $l_{ji}$  ( $j = n, s$ ) – направляющие косинусы главных напряжений ( $\sigma_i$ ) с нормалью к плоскости ( $\mathbf{n}$ ) разлома и направлением действия касательных напряжений ( $\mathbf{s}$ ) на ней.

Из соотношения (1) видно, что для определения кулоновых напряжений необходимо также уметь оценивать величину флюидного давления  $p_f$ , действующего в трещинно-поровом пространстве пород.

Существует большой спектр тектонофизических методов, позволяющих определять направления главных напряжений [Гзовский, 1954; 1956; Николаев, 1977; 1991; Парфенов, 1981; 1984; Расцветаев, 1982; 1987; Гинтов, Исая, 1984; Сим, 1996; Семинский, 2003; Anderson, 1951; Arthaud, 1969; Alexandrowsky, 1985; и др.]. Также имеется большая группа методов [Гущенко, 1975; 1979; Никитин, Юнга, 1976; Carey, Bruneier, 1974; Angelier, 1975; 1990; Юнга, 1979; 1990; Gephart, Forsyth, 1984; Michael, 1984; Lisle, 1987; 1992; и др.], в которых кроме направления действия осей главных напряжений дополнительно определяется форма эллипсоида напряжений, характеризуемая значениями коэффициента Лоде–Надаи. Понятно, что данных этих методов недостаточно для оценки нормальных и касательных напряжений на разрыве.

Существует только три тектонофизических метода, созданные в работах [Reches, 1978; 1983; 1987; Angelier, 1989; Ребецкий, 1999; 2003], в которых разработаны алгоритмы второго этапа реконструкции напряжений, позволяющие рассчитывать величины максимальных касательных напряжений и всестороннего давления. Эти алгоритмы опираются на анализ однородной выборки геологических или сейсмологических индикаторов разрывных деформаций (трещины в виде зеркал скольжения и механизмы очагов землетрясений) на диаграмме Мора (рис. 5). В методе катакластического анализа разрывных смещений [Ребецкий, 2003] нормированные максимальные касательные напряжения и эффективное давление определяются на основании положения о том, что в сейсмогенных зонах достигнуто предельное состояние (касание большого круга Мора линии предела прочности массива),

$$\begin{aligned} \tau_n + k_f \sigma_{nn}^* &= \tau_f \text{ при } \tau_n = \tau \tilde{\tau}_n^F \text{ и} \\ \sigma_{nn}^* &= -p^* + \tau \tilde{\sigma}_{nn}^F \end{aligned} \quad (5)$$

и определением нулевой прочности сцепления для очага землетрясения с минимальным сопротивлением сил трения

$$\begin{aligned} \tau_n + k_f \sigma_{nn}^* &= 0 \text{ при } \tau_n = \tau \tilde{\tau}_n^K \text{ и} \\ \sigma_{nn}^* &= -p^* + \tau \tilde{\sigma}_{nn}^K \end{aligned} \quad (6)$$

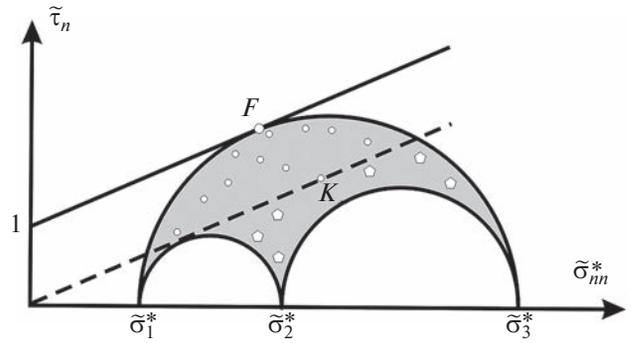


Рис. 5. Диаграмма Мора с данными о нормированных напряжениях в очагах землетрясений (кружочки белого цвета), по механизмам очагов которых были определены параметры эллипсоида напряжений. Точка К отвечает землетрясению с минимальной прочностью на разрыве, определяемом только напряжениями трения ( $k_f \sigma_{nn}^*$ ). Пятиугольники – напряженные состояния разрывов, для которых кулоновы напряжения отрицательные.

Из выражений (5) и (6), используя (4) для точек В и К на диаграмме Мора (рис. 5), можно получить:

$$\begin{aligned} \left\langle \frac{\tau}{\tau_f} \right\rangle &= \frac{1}{\operatorname{cosec} 2\alpha_f - (\tilde{\tau}_n^K + k_f \tilde{\sigma}_{nn}^K)}; \\ \left\langle \frac{p^*}{\tau_f} \right\rangle &= \frac{(\tilde{\tau}_n^K + k_f \tilde{\sigma}_{nn}^K) - k_f \mu_\sigma / 3}{k_f [\operatorname{cosec} 2\alpha_f - (\tilde{\tau}_n^K + k_f \tilde{\sigma}_{nn}^K)]}, \end{aligned} \quad (7)$$

определяющие с точностью до нормировки на значение прочности сцепления массива  $\tau_f$  две очень важные компоненты тензора напряжений – максимальное касательное напряжение и эффективное давление.

Поскольку последний параметр должен отвечать прочности массива в масштабе усреднения напряжений в процессе тектонофизической реконструкции (для геологических данных – сотни метров, для сейсмологических данных с землетрясениями в диапазоне магнитуд от 3 до 6 усреднение составляет 10–100 км), то определить его в лабораторном эксперименте невозможно. В рамках такого типа данных (7) предельное соотношение (1) может быть переписано для нормированных напряжений:

$$\left\langle \frac{\tau_c}{\tau_f} \right\rangle = \left\langle \frac{\tau}{\tau_f} \tilde{\tau}_n \right\rangle + k_f \left( -\left\langle \frac{p^*}{\tau_f} \right\rangle + \left\langle \frac{\tau}{\tau_f} \right\rangle \tilde{\sigma}_{nn} \right) \leq 1, \quad (8)$$

в котором  $\tilde{\tau}_n$  и  $\tilde{\sigma}_{nn}$  – редуцированные напряжения, содержащие данные об осях главных напряжений и форме эллипсоида напряжений ( $\mu_\sigma$ ), определяемым по результатам первого этапа реконструкции напряжений. Соответственно пара-

метры в треугольных скобках, содержащиеся в правой части выражения (8), определяются по результатам второго этапа реконструкции.

Напряженные состояния на участках разрывов, для которых кулоновы напряжения положительные, попадают в полосу между линией предела максимальной прочности трещиноватого массива и линией сухого трения (рис. 5). В случае если локальная прочность участка разлома  $\tau_f^i$  меньше максимальной прочности массива  $\tau_f$ , на нем возможно достижение предельного состояния для нормированных кулоновых напряжений  $\tau_c/\tau_f < 1$ . Для тех участков разрывов, где нормированные кулоновы напряжения отрицательные, их напряженные состояния лежат ниже линии сухого трения на диаграмме Мора (рис. 5).

Таким образом, те тектонофизические методы, в которых разработаны алгоритмы нахождения величин или нормированных значений максимальных касательных напряжений и эффективного всестороннего давления, позволяют выполнять районирование разломов по уровню кулоновых напряжений.

Заметим, что в катакластическом методе [Ребецкий, 2003а] в рамках третьего этапа реконструкции разработаны алгоритмы оценки расчета прочности сцепления  $\tau_f$  за счет использования дополнительных данных в виде величины касательных напряжений, сброшенных в очаге землетрясения с наибольшей магнитудой в исследуемом регионе. На основании этого алгоритма показано, что прочность сцепления пород в масштабах коры (50–100 км) в зонах активных континентальных окраин отвечает 0.5–1.5 Мпа [Ребецкий, Маринин, 2006; Ребецкий, 2009], а в коре внутриконтинентальных орогенов около 5 Мпа [Ребецкий, 2015].

## ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКАЯ РЕКОНСТРУКЦИЯ ПРИРОДНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ВОСТОЧНОЙ АНАТОЛИИ

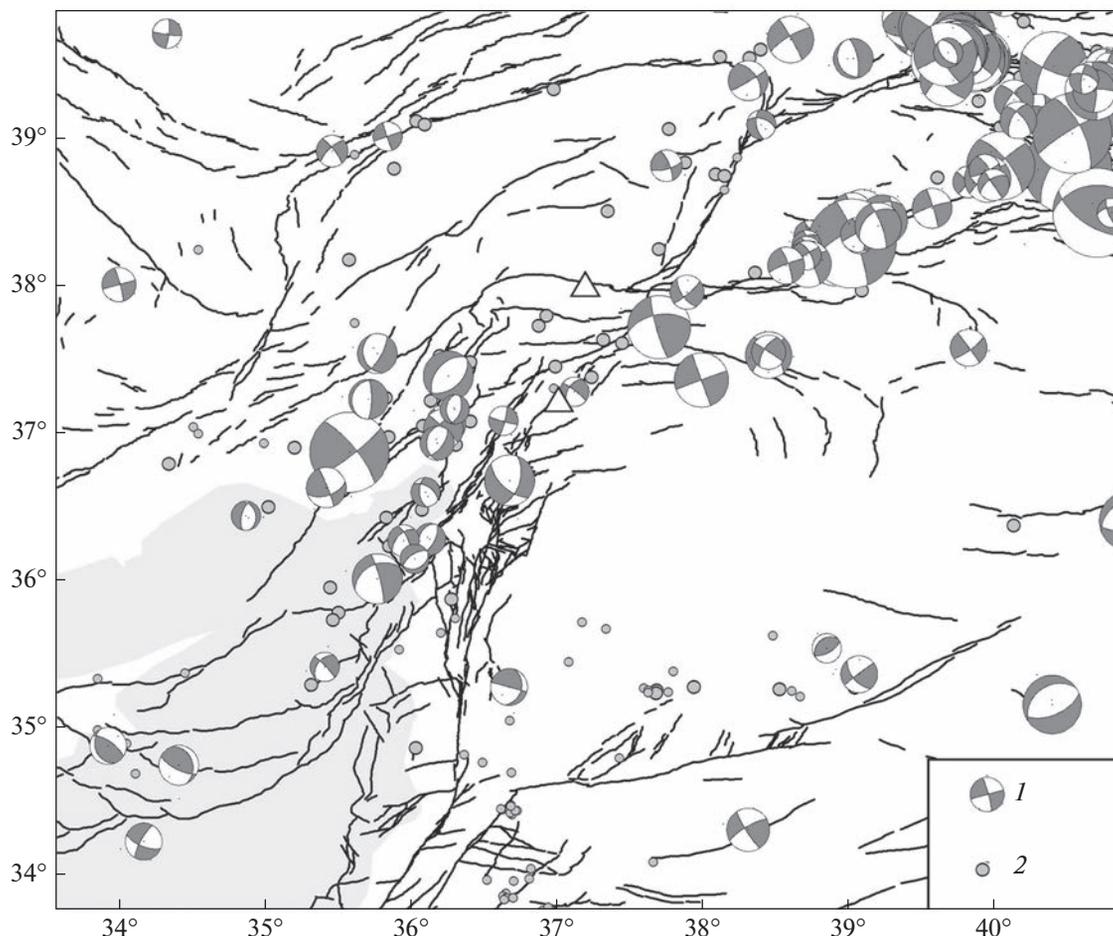
Сразу после произошедших катастрофических и сильных землетрясений в Восточной Анатолии (буквально уже 9 февраля) была выполнена работа по тектонофизической инверсии напряжений из сейсмологических данных о механизмах очагов коровых землетрясений. Оперативность проведения этой работы стала возможной благодаря высокой степени актуальности каталога механизмов очагов землетрясений для этой территории, который был подготовлен нами к концу 2022 г. в рамках проекта РНФ 22-27-00591 “Развитие методов тектонофизического районирования активных разломов земной коры”. Большую роль в выполнении данной работы также оказало размещение в 2020 году в сети Интернет “Базы дан-

ных активных разломов Евразии” (<http://neotec.ginras.ru/database.html>) [Бачманов и др., 2017] сотрудниками ГИН РАН.

Каталог механизмов очагов землетрясений для участка 33°–40° в.д. и 33°–40° с.ш. (Восточная Анатолия) состоял из 223 событий с магнитудами  $M_b$  от 3.0 до 6.8, произошедших на глубине до 56 км с 1951 г. по январь 2023 г. (рис. 6). Этот каталог являлся сборным и содержал данные о землетрясениях из каталогов международных сейсмологических баз данных GLOBAL CMT (<http://www.globalcmt.org>), ISC (<http://www.isc.ac.uk>), ESMC ([www.emsc.eu](http://www.emsc.eu)), а также региональных баз данных KANDILLI Observatory and Earthquake Research Institute (<http://www.koeri.boun.edu.tr>) и российской Единой геофизической службы (<http://www.admobninsk.ru>).

Реконструкция напряжений для района, существенно превышающего область возникновения двух сильнейших землетрясений в провинции Караманмараш, выполнялась по данным сборного каталога механизмов очагов землетрясений с помощью программы STRESSseism, алгоритм которой основан на катакластическом методе [Ребецкий, 1999; 2003]. Шаг узлов сетки расчета составлял 0.2 градуса по широте, что было в несколько раз меньше масштаба усреднения напряжений. В окончательном варианте расчета для 715 узлов были получены данные об ориентации главных осей тензора напряжений и значении коэффициента Лоде–Надаи, определяющем форму эллипсоида напряжений – первый этап реконструкции.

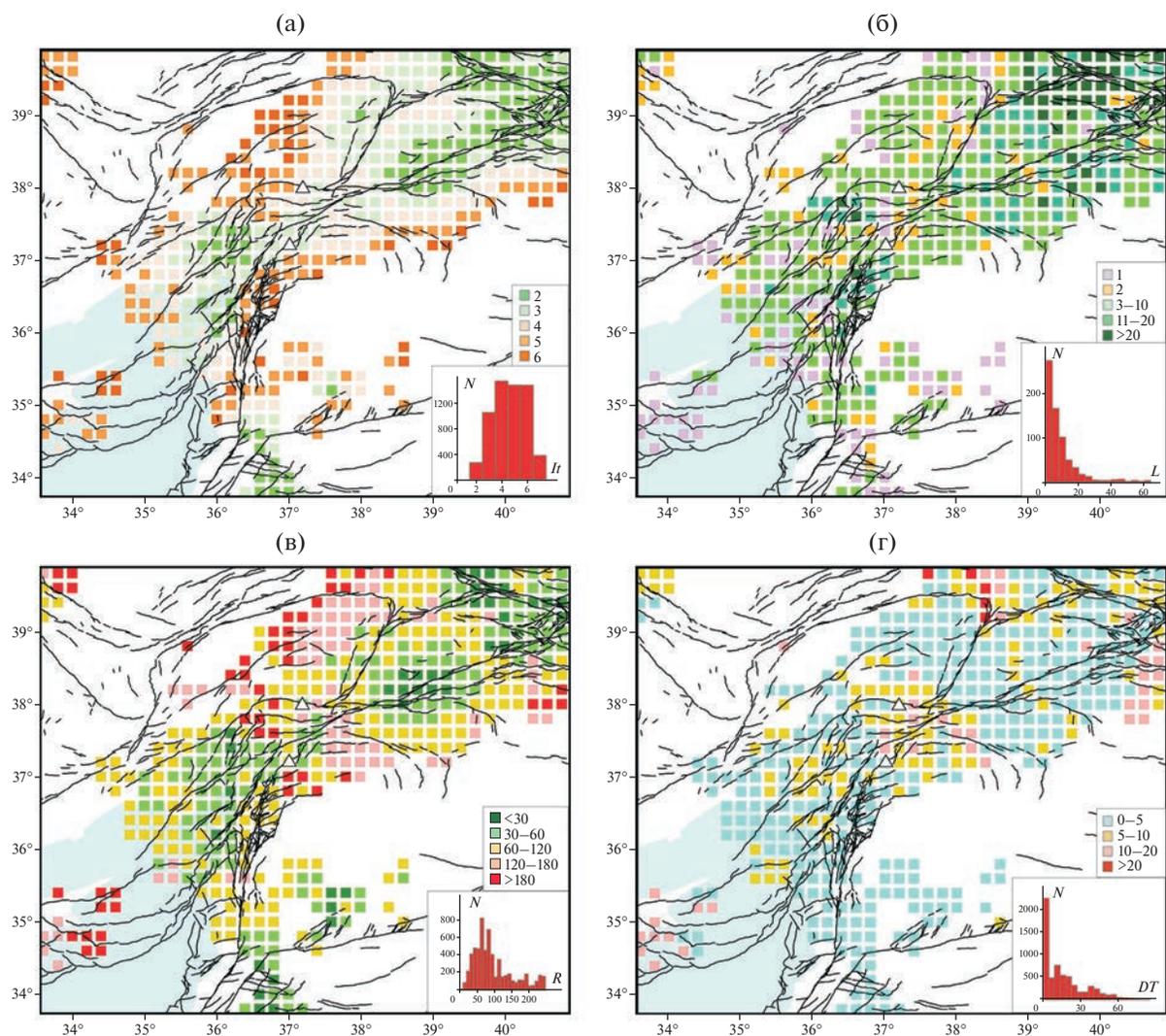
Алгоритм расчета напряжений в узлах расчетной сетки предусматривает создание однородных выборок землетрясений, данные о механизмах которых не являются взаимно противоречивыми. Критерий однородности выборки механизмов основан на требованиях уменьшения упругой энергии в результате произошедшего землетрясения на рассчитанных параметрах тензора напряжений (острый угол между вектором смещения на сейсмогенном разрыве и касательными напряжениями для искомого тензора напряжений), а также на упорядоченности снимаемых упругих деформаций в направлениях действия главных напряжений [Ребецкий, 2003а; 2003б]. Следствием этих критериев является система неравенств, накладывающая определенные ограничения на величины снимаемых упругих деформаций в направлениях действия главных осей тензора напряжений. Эти критерии более физичны и создают более “мягкие” ограничения на взаимоотношения параметров систем трещин и тектонических напряжений, чем следствия гипотезы Валласе [Wallace, 1951] и Ботта [Bott, 1959] о совпадении на плоскости разрыва векторов смещения и действующего здесь касательного напряжения.



**Рис. 6.** Механизмы очагов землетрясений сборного каталога: 1 –  $M_w \geq 5$ ; 2 –  $M_w < 5$ . Здесь и далее показано положение разломов согласно базе данных активных разломов Евразии [Бачманов и др., 2017].

Положение об уменьшении упругой энергии после смещения по разрыву в виде соответствующих неравенств, определяющих уменьшение упругих деформаций укорочения в направлении напряжений наибольшего сжатия и увеличение этих деформаций в направлении напряжений наименьшего сжатия, составляют основу методов Ж. Анжелье [Angelier, 1975] и О.И. Гущенко [Гущенко, 1975]. Положение об упорядоченности снимаемых упругих деформаций составляет основу катакластического метода [Ребецкий, 1999; 2003а; 2003б] и является расширением принципов теории пластичности [Черных, 1988] на псевдопластическое – катакластическое поведение горных пород, возникающее за счет трещинного течения. Неравенства, следующие из этого положения, включают в себя неравенства методов Ж. Анжелье и О.И. Гущенко. В них также имеется дополнительное неравенство, вытекающее из ограничения для снимаемых упругих деформаций в направлении промежуточного главного напряжения.

Практика работы программы STRESSseism показала, что используемая в ней система неравенств, ограничивающая ориентацию осей главных напряжений для однородной выборки механизмов очагов землетрясений, позволяет для 10–12 землетрясений достаточно качественно определять параметры эллипсоида напряжений. Достаточно часто даже в сейсмически активных регионах плотность распределения эпицентров землетрясений не одинаковая. Из-за этого при создании выборок землетрясений с постоянным окном их отбора из каталога механизмов очагов большая часть территории остается неохваченной расчетом напряжений. В современной версии программы STRESSseism разработан алгоритм итерационного создания выборок землетрясений, при котором в областях высокой плотности эпицентров окно сбора данных небольшое, а в областях низкой плотности оно постепенно (с заданным шагом) возрастает до некоторого предельного значения. Такой подход позволил в 715 узлах получить данные о



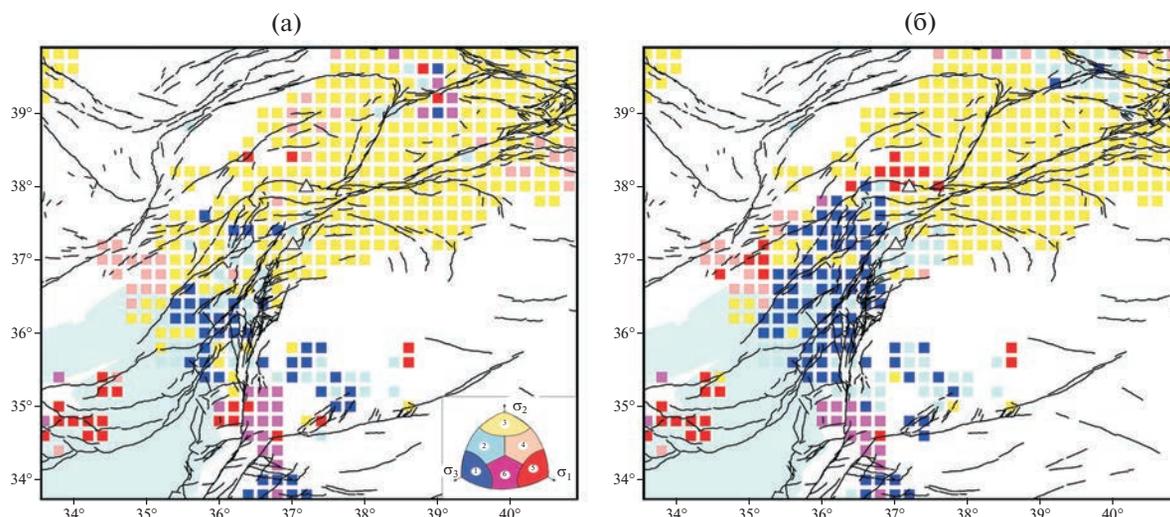
**Рис. 7.** Характеристики реконструкции в узлах расчета напряжений: (а) — число итераций ( $It$ ) при создании начальной выборки; (б) — число расчетов ( $L$ ) напряжений с разными временными периодами напряжений в одном узле; (в) — радиус ( $R$ ) усреднения напряжений по латерали (км); (г) — временные интервалы ( $DT$ ) усреднения напряжений, отвечающие последнему по времени расчету в данном узле (годы). Эпицентры двух землетрясений в провинции Караман-мараш здесь и на следующих рисунках показаны треугольниками белого цвета.

напряженном состоянии коры. На рис. 7а в узлах расчетной сетки показано число итераций, которое было сделано при поиске окна сбора данных о землетрясениях.

Важно понимать, что получаемые в процессе тектонофизической реконструкции данные о напряжениях отвечают масштабу усреднения, зависящему от диапазона магнитуд землетрясений, механизмы очагов которых используются, а также от плотности расположения эпицентров землетрясений. Поскольку рис. 7а косвенно отражает плотность распределения эпицентров землетрясений, то, следовательно, он также характеризует размер окна усреднения напряжений (рис. 7в). В исследуемом регионе эти параметры сборного каталога механизмов очагов землетрясений поз-

воляют говорить о возможных масштабах усреднения в разных точках от 10 до 250 км по латерали и по всей мощности коры. Наиболее представительными являются масштабы усреднения напряжений от 35 до 95 км (см. диаграмму рис. 7в).

Поскольку шаг расчетной сетки составлял около 24 км по долготе и 18 км по широте, то хорошая детальность изменения напряжений достигалась только в областях с размером окна усреднения менее 50 км (рис. 7в). К таким областям относился практически весь ВАЗР и сопряженные с ним области в диапазоне полосы 100–150 км. Вне этой зоны детальность результатов реконструкции существенно меньшая, что следует учитывать при анализе распределения кулоновых



**Рис. 8.** Геодинамический тип напряженного состояния для реконструкции, отвечающей в каждом из узлов: (а) — первому (1990–2010 гг.); (б) — последнему (2010–2022 гг.) — расчету по шкале времени. В правом нижнем углу показано расположение в октанте главных напряжений оси на зенит, что определяет тип напряженного состояния: 1 — гор. растяжение; 2 — гор. растяжение со сдвигом или трансенсия; 3 — гор. сдвиг; 4 — гор. сжатие со сдвигом или транспрессия; 5 — гор. сжатие; 6 — вертикальный сдвиг.

напряжений и прогнозе ожидаемых землетрясений.

В программе STRESSseism создание однородной выборки землетрясений выполняется путем последовательной, по шкале времени, проверки на однородность механизмов очагов землетрясений, области упругой разгрузки которых включают точку расчета. Поэтому при большем числе землетрясений, произошедших вблизи расчетной точки, имеется возможность получить данные о напряжениях, отвечающих разным временным периодам напряженного состояния.

Достаточная плотность распределения эпицентров землетрясений в широкой полосе ВАЗР (около 200 км) позволила для 715 узлов создать 6234 однородные выборки механизмов очагов землетрясений, по данным о которых были рассчитаны напряжения. При этом для более 300 узлов было выполнено менее четырех расчетов напряжений (рис. 7б). В среднем около 9 таких расчетов приходилось на каждый узел сетки. Таким образом, по результатам реконструкции напряжений была получена возможность выполнить мониторинг напряжений. При этом усреднение напряжений по шкале времени для почти 35% расчетов составляло около 4.5 лет и для 30% расчетов более 30 лет (см. диаграмму рис. 7г). Замечено, что меньший временной диапазон расчетов часто связан не с плотностью эпицентров землетрясений, а с периодом развертывания сейсмических сетей в регионе.

Здесь мы покажем только два крайних временных варианта расчетов в каждом из узлов: наиболее ранний, как правило, отвечающий 1990–2010 гг.,

и наиболее поздний, близкий к нашему времени, соответствующий в основном периоду 2010–2022 гг. Сравнение этих двух вариантов будет отражать общую тенденцию изменения напряжений в коре исследуемого региона.

На рис. 8 показан геодинамический тип напряженного состояния для самого раннего и самого позднего расчета в каждом из узлов. Этот параметр определяется по результатам анализа ориентации осей главных напряжений по отношению к вектору на зенит [Ребецкий, 2003а]. Из данных, отвечающих наиболее ранней стадии реконструкции (рис. 8а), видно, что большая часть Восточной Анатолии имеет режим напряженного состояния горизонтального сдвига с субвертикальной ориентацией осей промежуточного главного напряжений (разрывы — сдвиги по простиранию). Только в самой южной части ВАЗР появляются области с геодинамическим типом напряженного состояния в виде горизонтального растяжения и сдвига с растяжением (трансенсия). Сочетание горизонтального сдвига со сжатием (транспрессия) наблюдается в отдельных узлах для западной части области реконструкции напряжений и в виде обширной зоны на юго-западе. Режим горизонтального сжатия (взбросы) представлен на севере ВАЗР вблизи его сочленения с разломом Сюрю, на котором произошло второе из сильных землетрясений. На юге в зоне разлома Мертвого моря имеется большая область с режимом напряженного состояния в виде вертикального сдвига, для которого ось промежуточного главного напряжения субгоризонтальна, а два других

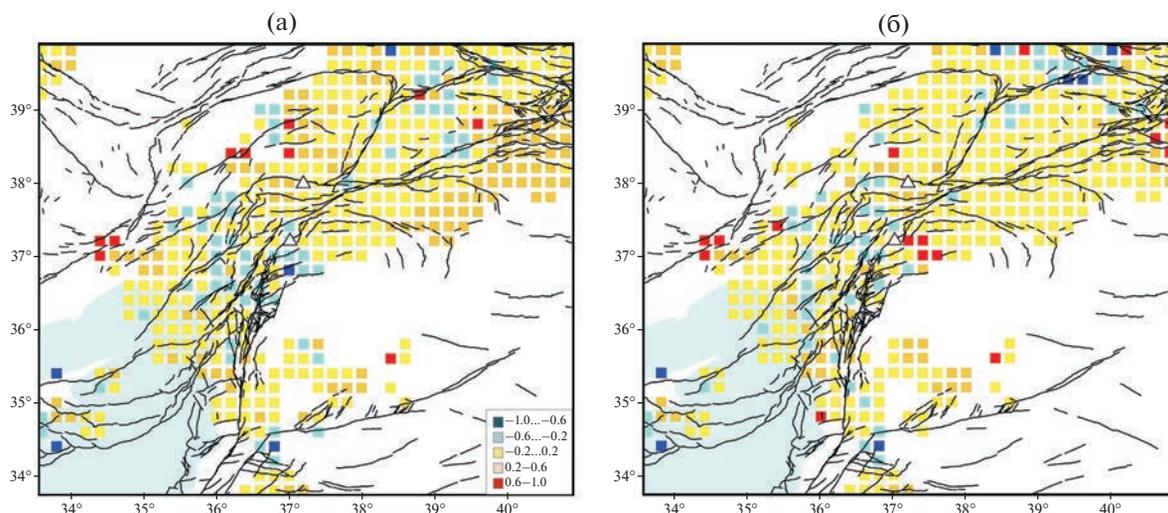


Рис. 9. Коэффициент Лоде–Надаи для реконструкции, отвечающей в каждом из узлов: (а) – первому (1990–2010 гг.); (б) – последнему (2010–2022 гг.) расчету по шкале времени.

главных напряжения имеют погружение  $30^{\circ}$ – $60^{\circ}$  (взрезы [Юнга, 1990]).

Сравнение данных рис. 8б (наиболее поздняя реконструкция напряжений в каждом из узлов) с данными рис. 8а показывает существенное изменение напряженного состояния. Для 520 узлов разница в периоде времени двух таких выборок составляла от 1 до 60 лет (наиболее представителью 20–25 лет), что позволяет увидеть тенденцию изменения напряженного состояния исследуемого региона перед Пазарджыкским катастрофическим землетрясением.

Главные изменения напряженного состояния произошли в южной части сейсмогенного участка разрыва Пазарджыкского землетрясения и к западу от него. Эпицентр этого землетрясения (первый сейсмогенный разрыв см. рис. 3а) также находился в зоне, испытывавшей изменение напряженного состояния. Эти изменения напряжений привели к существенном росту области с геодинамическим типом напряженного состояния горизонтального растяжения в южной части ВАЗР и его ближайшем окружении. Такие изменения должны приводить к уменьшению напряжений горизонтального сжатия, что также определяет снижение сил трения на разломе.

Обращаем также внимание на смену геодинамического типа напряженного состояния к северо-востоку от сочленения разлома Сюрдю с главной ветвью ВАЗР с горизонтального сжатия на горизонтальный сдвиг, а еще далее в северо-восточном направлении с горизонтального сдвига на сдвиг с растяжением. Это может свидетельствовать о том, что на участке ВАЗР к северо-востоку от разлома Сюрдю уменьшилось горизонтальное сжатие, т.е. уменьшилась прочность разлома, создаваемая за счет сил трения.

Подтверждают факт изменения во времени поля коровых напряжений в исследуемом регионе и сравнение данных об изменениях коэффициента Лоде–Надаи между ранней и поздней стадией реконструкции напряжений (рис. 9). Следует специально обратить внимание, что этот коэффициент является термином механики. Он определяет форму эллипсоида напряжений. Геодинамический тип напряженного состояния (рис. 8) определяет одну из главных осей напряжений, ближайшую по ориентации к оси на зенит. Он является термином геодинамики [Ребецкий, 2003а].

Если для наиболее ранней стадии расчета форма эллипсоида напряжений, отвечающая одноосному сжатию и его сочетанию со сдвигом (мех.), была широко представлена в коре окружения ВАЗР (более 35% определений), то на поздней стадии в большинстве этих узлов расчета форма эллипсоида сменилась на чистый сдвиг. Такие изменения в большей степени имели место в северо-восточном сегменте исследуемого региона. В северо-западном сегменте ВАЗР, где для ранней стадии расчета был наиболее представлен чистый сдвиг и его сочетание с растяжением, изменения коэффициента Лоде–Надаи также происходили, но в существенно меньшей степени. Можно видеть, что здесь также возросло число узлов с формой эллипсоида напряжений чистого сдвига, но это увеличение составило 10–15% и произошло за счет изменения разных начальных состояний.

Отметим, что в случае, когда имеет место форма эллипсоида напряжений, близкая к одноосному сжатию ( $\mu_{\sigma} \rightarrow +1$ ) или одноосному растяжению ( $\mu_{\sigma} \rightarrow -1$ ), возрастает вариабельность расположения скалывающихся трещин, стремящихся располагаться вокруг главных осей напряжений

соответственно максимального и минимального сжатия, создавая конусы трещин [Расцветаев, 1987]. При стремлении формы эллипсоида напряжений к чистому сдвигу ( $\mu_\sigma \rightarrow 0$ ) переменность расположения трещин в массиве пород начинает приближаться к системе сопряженных пар. Действующий в массиве геодинамический тип напряженного состояния позволяет понять, как в пространстве будут ориентированы формирующиеся конусы трещин или системы сопряженных пар трещин.

На рис. 10 в точках расчета показана ориентация проекций на горизонтальную плоскость осей трех главных напряжений также для двух крайних стадий расчета напряжений в каждом из узлов. Видно, что наряду с общей устойчивой картиной ориентации осей главных напряжений для ранней и поздней стадий расчета также существуют вариации, которые в большей степени проявляются там, где происходят изменения геодинамического типа напряженного состояния (рис. 8) или значений коэффициента Лодэ–Надаи (рис. 9).

Ориентация главных осей напряжений является базисом для тектонофизического анализа напряженного состояния. При этом достаточно часто для этого также используются данные об ориентации напряжений наибольшего ( $\sigma_H$ ) и наименьшего ( $\sigma_h$ ) горизонтального сжатия [Zoback, 1992]. Следует заметить, что во многих случаях для этого используют направления проекции соответствующих главных напряжений [Zoback, 1992; Heidbach et al., 2010; 2018], т.е. полагают, что азимуты этих главных осей определяют и направления действия напряжений наибольшего и наименьшего горизонтального сжатия.

На самом деле, это не так [Ребецкий, 2003а; Lund, Townend, 2007; Rebetsky, Polets, 2018]. Заметим, что, несмотря на представленные выше работы, одна из которых выполнена в связи с проектом WORLD STRESS MAP [Lund, Townend, 2007], в базе данных этого проекта в качестве направлений осей напряжений наибольшего и наименьшего горизонтального сжатия продолжают фигурировать данные об азимутах главных напряжений наибольшего и наименьшего сжатия.

Согласно выражениям:

$$\begin{aligned} \sigma_H &= -p + \\ &+ \tau \left[ \left( 1 - \frac{\mu_\sigma}{3} \right) I_{H1}^2 + \left( \frac{2\mu_\sigma}{3} \right) I_{H2}^2 - \left( 1 + \frac{\mu_\sigma}{3} \right) I_{H3}^2 \right], \\ \sigma_h &= -p + \\ &+ \tau \left[ \left( 1 - \frac{\mu_\sigma}{3} \right) I_{h1}^2 + \left( \frac{2\mu_\sigma}{3} \right) I_{h2}^2 - \left( 1 + \frac{\mu_\sigma}{3} \right) I_{h3}^2 \right] \end{aligned} \quad (9)$$

положение наибольшего и наименьшего горизонтального сжатия напряжений можно получить сечением эллипсоида напряжений горизонталь-

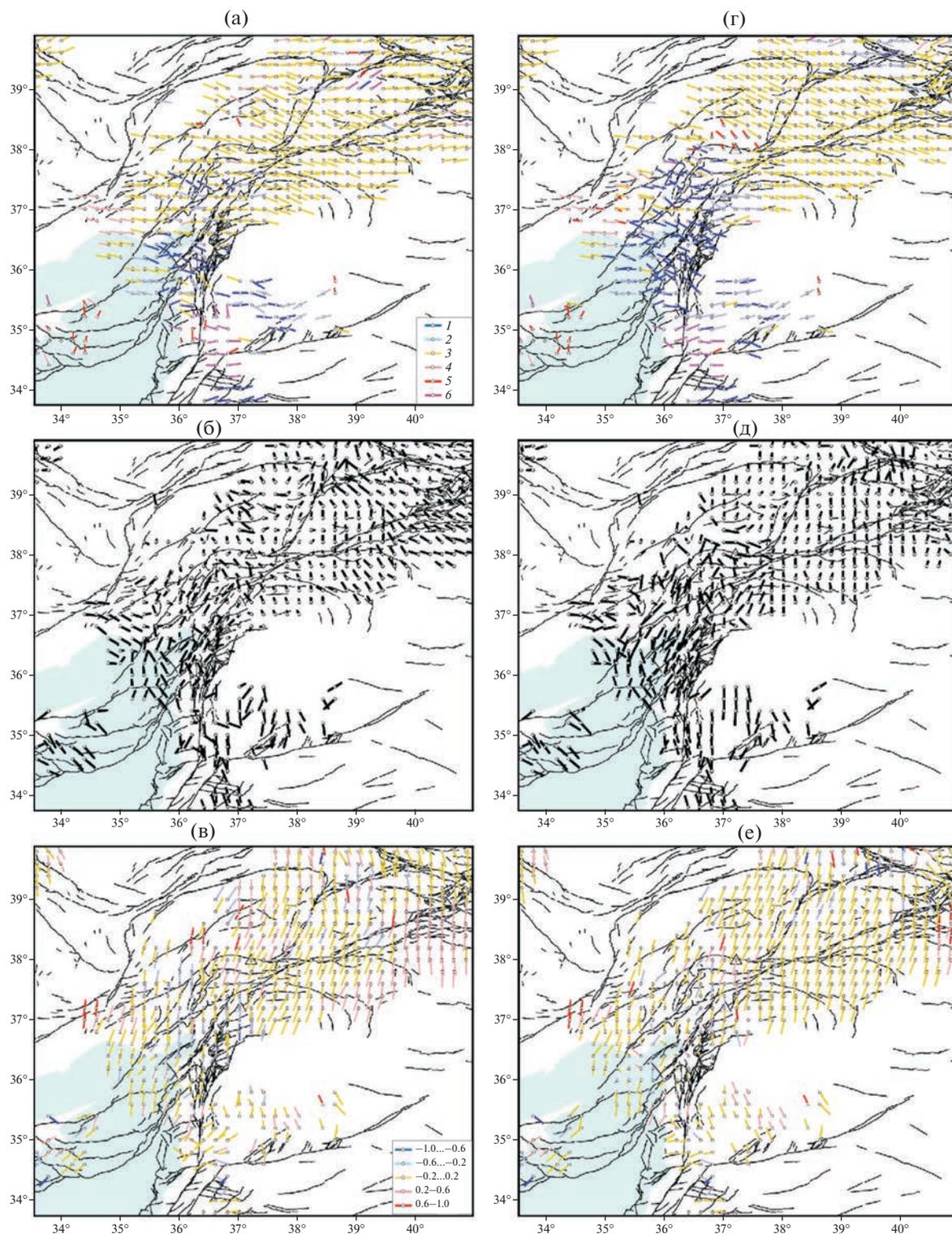
ной плоскостью или перебором всех горизонтальных направлений для напряжений и выбором тех, которые отвечают соответственно наибольшему и наименьшему горизонтальному сжатию.

На рис. 11 показана ориентация напряжений наибольшего и наименьшего горизонтального сжатия в коре исследуемого региона. Замечаем, что ориентация этих напряжений существенно более устойчивая в пространстве, чем для осей главных напряжений (рис. 10). Часто об изменении напряженного состояния в точке расчета между двумя стадиями свидетельствует не ориентация горизонтальных напряжений, а геодинамический тип напряженного состояния.

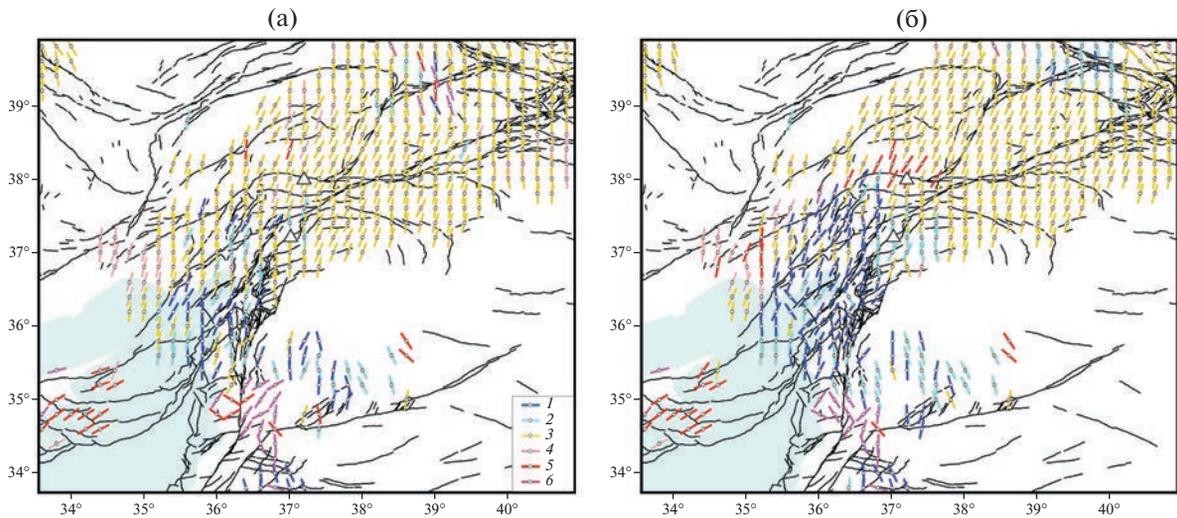
Из данных рис. 8а видно, что на начальном временном этапе реконструкции режим горизонтального сдвига захватывал практически всю зону ВАР. Исключением здесь был небольшой юго-восточной его участок с режимами горизонтального растяжения и растяжения со сдвигом (транстенсия), который распространялся в зону Ливантийского сдвигового разлома, переходя там в режим вертикального сдвига. Перед Пазарджыкским землетрясением (рис. 8б) зона с режимом горизонтального растяжения резко расширилась вплоть до эпицентра будущего катастрофического землетрясения. Появилась обширная область горизонтального растяжения со сдвигом в северо-восточном сегменте ВАР, где он сопрягается с Северо-Анатолийским разломом. Наряду с этим расширилась и стала более интенсивной зона горизонтального сжатия в юго-западном секторе ВАР, а также возникла новая зона горизонтального сжатия к югу от эпицентра Пазарджыкского землетрясения.

Специально следует отметить, что новые области горизонтального растяжения и сжатия приурочены к западному борту ВАР. Формирование таких пар областей диаметрально разного режима напряженного состояния согласно работам Д.Н. Осокиной [Осокина, 1987; Осокина, Фридман, 1987] может свидетельствовать о произошедших в период реконструкции напряжений лево-сдвиговых смещений в системе оперяющих разломов к западу от ВАР. В данном случае к таким относятся разломы Козан, Гоксун, Андирум и разлом Туркоглы, продолжающий на юго-запад разлом Пазарджык (рис. 3а). Возможно также, что такие движения захватили и разломы Мала-тия и Овасик, ответвляющиеся от ВАР в северо-восточном сегменте исследуемого региона. Следует отметить, что вдоль разломов Пазарджык и Ергани Гунус в последние 25 лет произошла серия сильных землетрясений с магнитудами 6.1–6.8, предварявшихся и продолжавшихся сериями менее сильных событий.

В рамках второго этапа реконструкции МКА были получены данные о максимальных кас-



**Рис. 10.** Проекция на горизонтальную плоскость осей главных напряжений для: (а)–(в) – первого (1990–2010 гг.); (г)–(е) – последнего (2010–2022 гг.) расчета по времени. (а), (г) – Минимальное сжатие (растяжение); (б), (д) – промежуточное главное напряжение; (в), (е) – максимальное сжатие. Оси построены в узле расчета (кружочек) в направлении погружения. При угле погружения менее 7.5 градусов длина осей максимальная с кружком посередине. Для напряжений наименьшего (а) и наибольшего (в) сжатия цвет осей определяет соответственно геодинамический тип напряженного состояния и значение коэффициента Лоде–Надаи (см. легенды рис. 8, рис. 9).



**Рис. 11.** Ориентация осей напряжений наибольшего горизонтального сжатия для двух стадий расчета напряженного состояния: (а) – первая (1990–2010 гг.); (б) – последняя (2010–2022 гг.). Геодинамический тип напряженного состояния: 1 – гор. растяжение; 2 – гор. растяжение со сдвигом или трансенсия; 3 – гор. сдвиг; 4 – гор. сжатие со сдвигом или транспрессия; 5 – гор. сжатие; 6 – вертикальный сдвиг.

тельных напряжениях  $\tau$  и эффективном всестороннем давлении  $p^*$ , нормированных на прочность сцепления массива  $\tau_f$  (см. выражения (7)). На рис. 12 показаны параметры напряженного состояния, отвечающие в каждом узле наиболее ранней и наиболее поздней по времени выборке землетрясений.

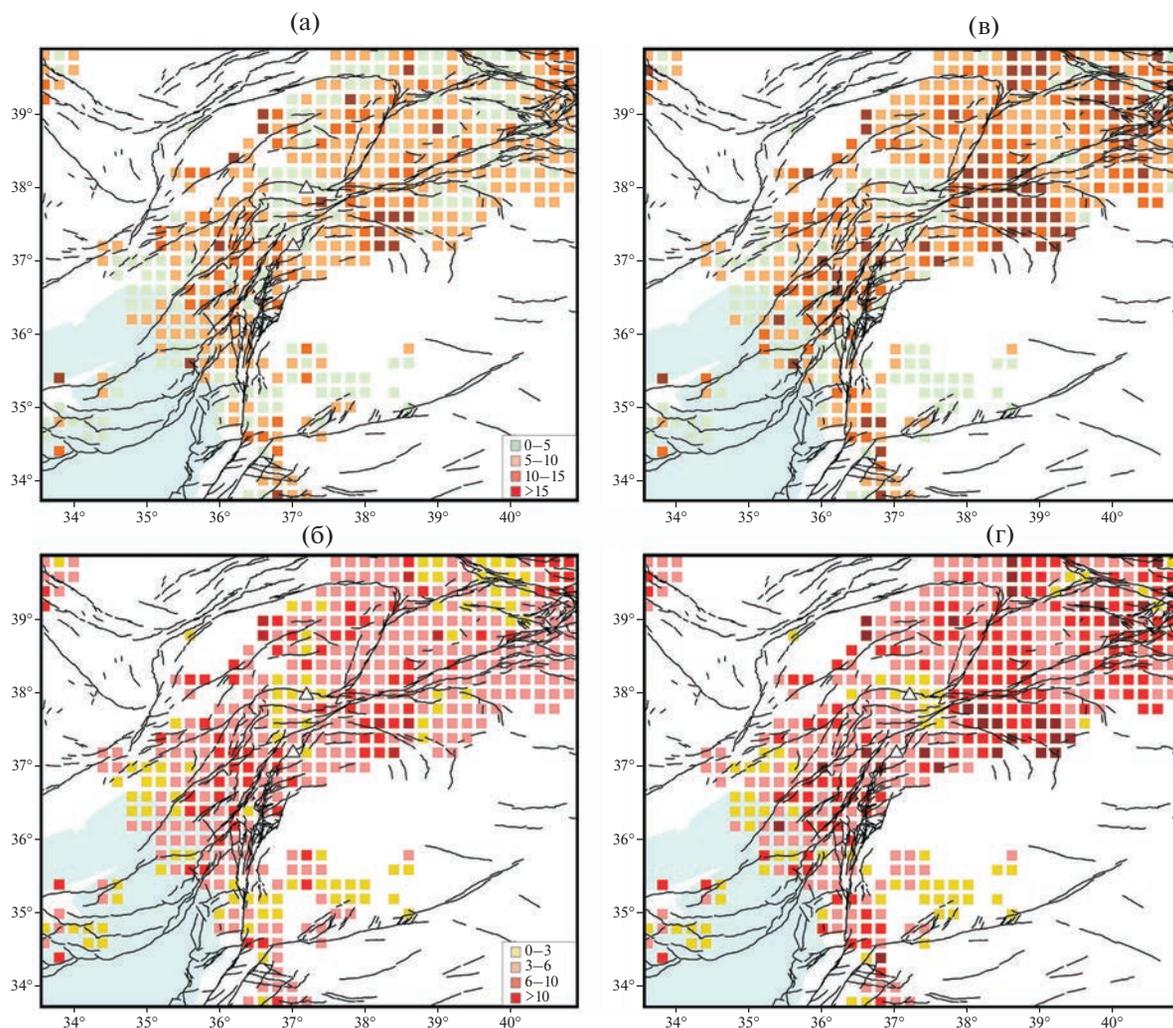
Как видно из данных рис. 12, для обеих стадий расчета участок ВАЗР в зоне будущего Пазарджыкского землетрясения в основном был представлен данными о величинах напряжения среднего и низкого уровня. Области наименьших величин напряжений приходились на второй сегмент (рис. 3а) сейсмогенного разрыва этого землетрясения. Третий сегмент имел несколько более высокий уровень напряжений. Точки с самыми высокими уровнями напряжений на ВАЗР располагались за пределами очага Пазарджыкского землетрясения.

Эпицентр Пазарджыкского землетрясения (первый сегмент) располагался на участке разлома, где для обеих стадий расчета имел место самый низкий уровень эффективного давления и средний уровень максимальных касательных напряжений. Отметим, что рядом с эпицентром землетрясения имеются точки расчета с высоким уровнем напряжений. Учитывая то, что шаг сетки расчета 40–50 км в 1.5–2 раза меньше линейного масштаба усреднения напряжений, можно говорить, что Пазарджыкское землетрясение возникло на участке разлома, где имеет место наибольший градиент напряжений. Согласно нашим исследованиям катастрофических землетрясений, происходивших с начала этого столетия в зонах

субдукции [Ребецкий, 2018; Rebetsky, Guo, 2020], их эпицентры тяготеют именно к таким участкам.

#### РАЙОНИРОВАНИЕ ОПАСНЫХ УЧАСТКОВ РАЗЛОМОВ ВОСТОЧНОЙ АНАТОЛИИ

В наших исследованиях данные о напряжениях, реконструированных в коре исследуемого региона алгоритмами первых двух этапов катаклического метода, являются исходными для расчета нормированных кулоновых напряжений  $\tau_c$  согласно выражению (8). Эти напряжения в соответствии с геомеханическими критериями хрупкого разрушения горных пород [Ребецкий, 2003а] отвечают за близость разломов к критическому состоянию. Кулоновые напряжения могут быть положительными, когда касательные напряжения  $\tau_n$  больше напряжений сил трения ( $k_f \sigma_{nn}^*$ ). Хрупкое разрушение произойдет, если кулоновые напряжения достигнут локальной прочности сцепления на участке разлома  $\tau_f^m$ , которая может быть ниже средней прочности сцепления разлома ( $\tau_f^m < \tau_f$ ). В рамках МКА после второго этапа реконструкции можно рассчитать нормированные на  $\tau_f$  эффективные нормальные  $\frac{\sigma_{nn}^*}{\tau_f}$  и касательные напряжения  $\frac{\tau_n}{\tau_f}$  на известных плоскостях участков разломов. Таким образом, согласно (1) можно рассчитать отношение кулоновых напря-



**Рис. 12.** Нормированные на прочность сцепления величины эффективного давления (а), (в) и максимального касательного напряжения (б), (г) для двух стадий расчета: первая (1990–2010 гг.) – (а), (б) и последняя (2010–2022 гг.) – (в), (г).

жений к прочности сцепления, которое должно быть меньше 1.

Как следует из (1), для расчета кулоновых напряжений на разломе необходимо для каждого участка разлома иметь не только информацию о его положении (простирации), но также о направлении погружения и угле погружения. Для разломов исследуемой территории такая информация частично присутствовала в базе данных активных разломов Евразии [Бачманов и др., 2017]. В ней для большой группы разломов имелось указание о направлении их погружения, а также указывалась кинематика разломов.

Поскольку этих данных для решения наших задач недостаточно, то нами была создана программа, которая на основе интерпретации данных о механизмах очагов землетрясений, произошедших на дистанциях менее 50 км от разломов, определяла их углы погружения.

Таким образом, на основании данных двух этапов реконструкции напряжений катакластическим методом и полученных нами данных о параметрах разломов были рассчитаны кулоновые напряжения для тех участков разломов, вблизи которых располагались узлы расчетной сетки (на расстояниях не более 100 км).

Районирование разломов по степени их опасности выполнялось путем разбиения положительных значений кулоновых напряжений на четыре диапазона: 1)  $0.8 < \frac{\tau_c}{\tau_f} \leq 1$ ; 2)  $0.5 < \frac{\tau_c}{\tau_f} \leq 0.8$ ;

3)  $0.2 < \frac{\tau_c}{\tau_f} \leq 0.4$ ; 4)  $-0.2 < \frac{\tau_c}{\tau_f} \leq 0.2$ , которые нами

именуются следующим образом: высшей опасности, опасный, тревожный и нейтральный. Последний диапазон изменения кулоновых напря-

жений  $\frac{\tau_c}{\tau_f} \leq -0.2$  определяется как безопасный.

В соответствии с этой градацией при землетрясении для участков разломов будет меняться уровень сброса касательных напряжений, определяющий и удельную плотность высвобождения упругой энергии при землетрясении.

Как видно из рис. 13, большая часть разломов (более 75%), для которых имеются данные о напряжениях, находятся в безопасном состоянии. При этом для юго-западного сегмента ВАЗР и его ответвлений в северном побережье Восточного Средиземноморья и Сирии соотношение опасных и безопасных разломов приближается к 1 : 1.

Накопленный опыт исследований кулоновых напряжений и, в частности, изучение области подготовки Веньчуанского землетрясения 2008 г. с  $M_w = 8.0$  [Ребецкий и др., 2021] показал, что его очаг располагался на разломе Лунмэньшань в области, где наряду с участками высокого уровня нормированных кулоновых напряжений ( $\tau_c > 0.8\tau_f$ ) имелись участки среднего уровня этих напряжений и даже небольшие по протяженности участки низких положительных значений ( $\tau_c < 0.3\tau_f$ ). При этом эпицентр очага Веньчуанского землетрясения находился вблизи участка протяженностью около 20 км, которому отвечал критически высокий уровень кулоновых напряжений ( $\tau_c > 0.6\tau_f$ ). Такой характер напряженного состояния на разломе соответствовал особенностям развития сейсмогенного разрыва – очага Веньчуанского землетрясения, где существовали протяженные участки относительно медленных сейсмических движений [Лю Цзяо, Рогожин, 2017], а также участки, где наблюдались наибольшие разрушения, и выделившаяся сейсмическая энергия была существенно выше [Yin et al., 2010].

По результатам тектонофизического районирования разломов на период времени, непосредственно предшествовавший двум сильнейшим землетрясениям в исследуемом регионе Восточной Анатолии, выделяются несколько разломов с наиболее протяженными (более 50 км) опасными участками положительных значений кулоновых напряжений:

1). Разлом Гоксун север–северо-восточного простирания к западу от ВАЗР. Здесь имеется два участка протяженностью более 50 км с уровнем кулоновых напряжений  $(0.5–0.8)\tau_f$ , разделенные короткой зоной (около 20 км) отрицательных их значений.

2). Разлом Андирун, субпараллельный разлому Гоксун к востоку от него, имел протяженность участка положительных значений кулоновых напряжений около 65 км и зону высоких значений около 30 км.

3). Разлом Мисис север–северо-восточного простирания к северу от разлома Гоксун. Имеет два участка положительных значений кулоновых напряжений около 30 и 60 км, разделенные зоной отрицательных их значений (около 25 км).

4). Зона разлома Латакия север–северо-восточного простирания, проходящая вдоль восточного побережья Средиземного моря. Протяженность участка положительных значений кулоновых напряжений около 50 км при небольшой зоне высоких их значений (около 15 км).

5). Система разломов Мертвого моря субмеридионального простирания к югу от ВАЗР. Протяженность участка положительных значений кулоновых напряжений достигает 100 км, а зоны высоких значений – 40 км. Вблизи разлома Мертвого моря также имеется несколько разломов такого же простирания с очень высоким уровнем кулоновых напряжений.

6). Разлом Кирикхан, входящий в юго-западную систему ВАЗР. Участок положительных значений кулоновых напряжений около 70 км и зона очень высоких значений – около 30 км.

7). Разлом Амэнос на юго-западе ВАЗР к северо-востоку от разлома Кирикхан (здесь расположен третий сегмент очага Пазарджыкского землетрясения). Имеются два участка положительных, высоких значений кулоновых напряжений около 60 и 70 км, разделенных областью отрицательных значений.

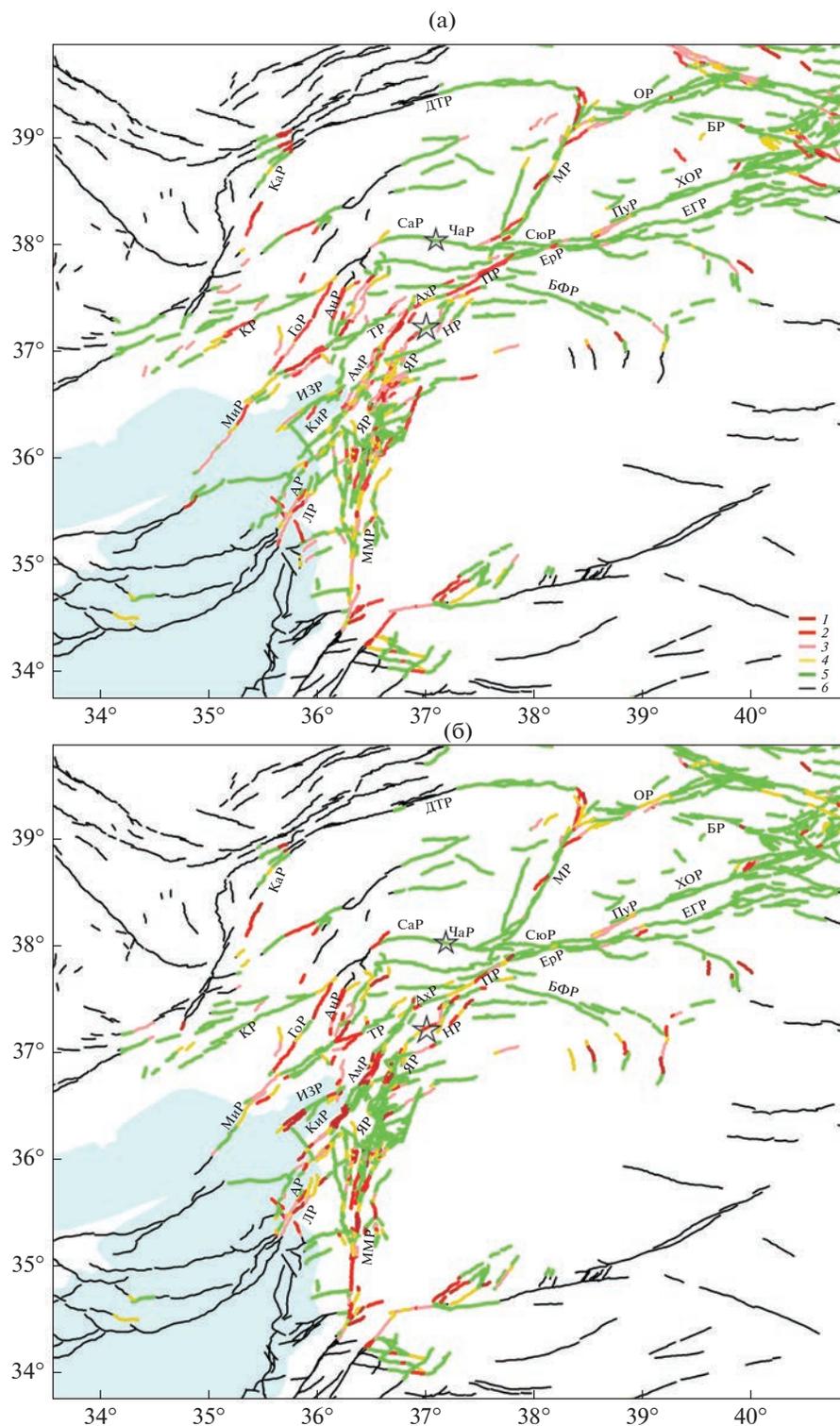
8). Разлом Пазарджык входит в систему ВАЗР и располагается к северо-востоку от разлома Амэнос (здесь расположен второй сегмент очага Пазарджыкского землетрясения). Имеет протяженный участок (около 70 км) положительных значений кулоновых напряжений средней и невысокой интенсивности.

9). Разлом Малатия север–северо-восточного простирания к северу от ВАЗР, сопрягающий его с разломами Делялер Текер и Овасик. Участок положительных значений кулоновых напряжений около 50 км и зона высоких значений – около 20 км.

10). Разлом Овасик северо-восточного простирания к северу от ВАЗР. Участок положительных значений кулоновых напряжений около 100 км при небольшой зоне этих напряжений среднего уровня – около 20 км.

Другие разломы имеют участки положительных и даже высоких значений кулоновых напряжений менее 50 км, что соответствует возможности возникновения на них землетрясений с магнитудами 6.5–7.0.

Проведенный анализ показывает, что зона ВАЗР, имевшая высокую детальность рассчитанных напряжений, выглядит опасной, т.к. в области будущего очага Пазарджыкского землетрясе-



**Рис. 13.** Районирование для двух стадий расчета напряженного состояния: (а) – первая (1990–2010 гг.); (б) – последняя (2010–2022 гг.) – участков активных разломов из базы данных [Бачманов и др., 2017] по уровню кулоновых напряжений: 1 –  $0.8 < \frac{\tau_c}{\tau_f} \leq 1$  (темно-красный); 2 –  $0.5 < \frac{\tau_c}{\tau_f} \leq 0.8$  (красный); 3 –  $0.2 < \frac{\tau_c}{\tau_f} \leq 0.5$  (светло-красный); 4 –  $-0.2 < \frac{\tau_c}{\tau_f} \leq 0.2$  (желтый); 5 –  $\frac{\tau_c}{\tau_f} \leq -0.2$  (зеленый); 6 – данные о напряжениях на разломе отсутствуют (черный). Звездочками показаны эпицентры Пазарджыкого и Эльбистанского землетрясений. См. также подрисную подпись к рис. 1.

ния на протяженности около 300 км имелись участки очень высокого уровня кулоновых напряжений ( $\tau_c > 0.8\tau_f$ ) для разломов Кирикхан и Амэнос (третий сегмент очага см. рис. 3а), хотя между ними и располагалась зона (около 30 км) с отрицательными значениями кулоновых напряжений. Кроме того, на северо-восточном участке очага Пазарджыкского землетрясения (второй сегмент очага см. рис. 3а) в пределах разлома Турколы также существовал протяженный участок положительных значений кулоновых напряжений средней и невысокой интенсивности. От опасного участка разлома Амэнос он отделялся также протяженной зоной (около 70 км) отрицательных значений кулоновых напряжений.

Разлом, на котором находился эпицентр Пазарджыкского землетрясения, являвшийся ответвлением в системе ВАЗР в восточном его крыле, вдоль всего протяжения первого сегмента очага (см. рис. 3а) имел положительные значения кулоновых напряжений. Причем сам эпицентр находился на участке высокого уровня кулоновых напряжений. Этот разлом расположен к северу от двух других сегментов Пазарджыкского землетрясения на расстоянии от 25 до 8 км и по данным активных разломов Евразии [Бачманов и др., 2017] не имел прямого пересечения с ними.

Важно отметить, что зона будущего очага Пазарджыкского землетрясения выглядела более опасной для начального периода реконструкции напряжений (рис. 13а). В период времени, приближенный к началу 2023 г. (рис. 13б), протяженность и интенсивность опасных участков для его северо-восточной части немного снизилась, в то время как повысилась опасность юго-западного сегмента и области вблизи эпицентра землетрясения. Можно предположить, что эти изменения кулоновых напряжений были обусловлены левосдвиговыми смещениями, которые происходили в интервале времени между двумя представленными периодами реконструкции.

Для субширотных разломов Сюрдю, Чардак и Сунгун, на которых произошло второе сильное землетрясение, величина кулоновых напряжений была всюду отрицательной. Здесь напряжения, действовавшие по нормали к разлому, были столь высоки, что напряжения трения ( $k_f\sigma_{mn}^*$ ) превышали уровень касательных напряжений ( $\tau_n$ ). Такое же состояние было и для других субширотных разломов, располагавшихся южнее.

## ОБСУЖДЕНИЕ

Работы по изучению распределения опасности активных разломов по результатам тектонофизической реконструкции природных напряжений начали проводиться относительно недавно [Ре-

бецкий, Кузиков, 2016; Ребецкий и др., 2021]. В этом отношении они существенно уступают опыту работ изучения закономерности изменений кулоновых напряжений на основе математического моделирования [Stein et al., 1992; Okado et al., 1992; Harris et al., 1995; и др.]. Для реализации тектонофизического подхода в расчете кулоновых напряжений требуются данные не только о параметрах эллипсоида напряжений (ориентация главных осей тензора напряжений и форма эллипсоида), но также величины максимальных касательных напряжений и эффективного давления либо нормированных их значений. Это существенно большая информация, чем та, что используется при математическом моделировании изменения кулоновых напряжений.

Теоретические положения геомеханики определяют, что опасным участком активного разлома можно считать зону положительных значений кулоновых напряжений, т.к. локальная прочность разломов на разных их участках может сильно варьироваться. Особо опасным участком является относительно протяженная зона высокого уровня положительных значений кулоновых напряжений (более  $0.6-0.8\tau_f$ ). Ожидаемый минимальный магнитудный уровень прогнозируемого сейсмогенного участка разлома определяется не шагом узлов сетки, в которых получены данные о напряжениях, а масштабом усреднения кулоновых напряжений. Он, в свою очередь, связан с магнитудным диапазоном исходных для реконструкции напряжений данных о механизмах очагов землетрясений, а также с плотностью распределения эпицентров землетрясений. Для ВАЗР минимальная прогнозная магнитуда составляла 6.5–7.0, т.к. здесь наблюдалась наибольшая плотность эпицентров землетрясений, для которых имелись данные об их механизмах очагов (рис. 6), и поэтому имел место наименьший масштаб усреднения напряжений (рис. 7б). На некотором удалении от ВАЗР для других областей масштаб усреднения повышался до 100 км и более, что определяло нижний магнитудный уровень прогноза в 7.5.

С другой стороны, накопленный опыт тектонофизических исследований показал, что в очаге Веньчуаньского землетрясения 2008 г. [Ребецкий и др., 2021] участки повышенного уровня кулоновых напряжений прерывались зонами низких положительных их значений и даже малыми по протяженности участками отрицательных значений кулоновых напряжений. Результаты исследований для Караманмарашских землетрясений подтвердили эти выводы. Таким образом, ожидаемый максимальный магнитудный уровень прогнозируемого сейсмогенного участка разлома, получаемый из результатов анализа кулоновых напряжений, определяется всей прерывистой зо-

ной положительных их значений. При этом на концах этой опасной зоны должны существовать протяженные зоны отрицательных кулоновых напряжений.

О том, что очаг Пазарджыкского землетрясения не являлся однородным и мог содержать как зоны высокого уровня положительных значений кулоновых напряжений, так и участки отрицательных значений, говорят также исследования изменения интенсивности направленности сейсмического излучения [Павленко, Павленко, 2023].

Одной из причин разрушений зданий специалисты по сейсмостойкому строительству и сейсмологи рассматривают так называемые “импульсоподобные волновые формы” (*pulse-like features*) [Baez, Miranda, 2000; Iervolino et al., 2012; Shahi, Baker, 2011; Павленко, Павленко, 2023], характеризующиеся наличием импульсов ускорения большой продолжительности, которым соответствуют и импульсы скорости необычно большой величины – сверхскоростные разрывы. Такие импульсы наблюдаются на станциях, расположенных вблизи сейсмогенного разлома, при распространении на него разрыва в очаге (*forward propagation*). Для стандартных скоростей распространения фронта очага землетрясения эти импульсы сильнее выражены на горизонтальных компонентах, ориентированных перпендикулярно разлому [Павленко, Павленко, 2023]. Доминирование параллельных компонент является типичной особенностью сверхскоростных разрывов [Rosakis et al., 1999].

Импульсоподобные волновые формы движения грунта возникают из-за практически одновременного прихода на сейсмическую станцию поперечных волн, излучаемых из разных точек развивающегося в направлении станции очага [Somerville et al., 1997]. Возникающая при этом интерференция упругих волн способна обеспечить увеличение частоты колебаний при повышении их амплитуды. Поскольку фактическая скорость распространения поперечных волн вдоль сейсмогенного разрыва является суммой скорости движения грунта для фронта разрыва (для Пазарджыкского землетрясения около 5 км/с [Rosakis et al., 2023]) и скорости поперечных упругих волн (около 3.3 км/с), то причиной появления сверхвысоких скоростей волн и изменения интенсивности направленности сейсмического излучения является именно первый из рассмотренных факторов. Само изменение скорости развития фронта разрыва и скорости движения грунта можно прямо связывать с изменением характера напряженного состояния вдоль сейсмогенного разрыва.

Таким образом, данные о наличии сверхвысоких скоростей волн говорят о существовании участков разломов с напряженным состоянием,

благоприятным для увеличения скорости распространения фронта разрыва. В то время, как появление импульсоподобных волновых форм показывает наличие на разрыве участков существенно различного напряженного состояния – как способствующего разрывообразованию, так и не способствующего ему. При этом участок пониженной скорости развития фронта очага находится ближе к станции наблюдения, чем участок высокой скорости.

ВАРЗ вблизи очага Пазарджыкского землетрясения характеризуется наличием масштабных разрушений. Тысячи зданий и десятки крупных и мелких городов серьезно пострадали при землетрясении. В работе [Baltzopoulos et al., 2023] по данным AFAD Государственного агентства по борьбе со стихийными бедствиями при Министерстве внутренних дел Турции (AFAD) исследовались пиковые ускорения (PGA) по записям сейсмических станций, расположенных на разных и эпицентральных расстояниях. Было показано, что спектральные амплитуды регистрировались движения грунта достигали 2.8 g. Согласно этим исследованиям показано наличие 6 станций, для которых наблюдались импульсоподобные волновые формы. Эти станции располагались на север–северо-восточной части разлома Нарли (первый сегмент очага), а также на северо-восточной части разлома Амэнос (третий сегмент очага).

Как было показано в работе [Abdelmeguid et al., 2023] первой станцией, зафиксировавшей почти 20% превышение скорости поперечных волн в направлении сейсмогенного разрыва над скоростью этих волн по нормали к нему, являлась станция, расположенная вблизи разрыва Нарли к север–северо-востоку от эпицентра Пазарджыкского землетрясения (около 30 км). Согласно данным рисунка 13 как раз перед этой станцией располагались два участка пониженных положительных (от 0.2 до 0.5) и практически нулевых (от –0.2 до 0.2) значений нормированных кулоновых напряжений.

Данные обеих работ [Baltzopoulos et al., 2023; Abdelmeguid et al., 2023] хорошо соответствуют результатам тектонофизического районирования ВАРЗ по уровню кулоновых напряжений (рис. 13). Для Пазарджыкского землетрясения наиболее опасными по уровню кулоновых напряжений выглядели первый и третий его сегменты (рис. 3). При этом самый высокий уровень кулоновых напряжений отмечен на разломе Нарли вблизи эпицентра этого землетрясения, а также двух протяженных участков разлома Амэнос в его южной и центральной части. Эти участки разделялись зоной отрицательных значений кулоновых напряжений. Обширная область отрицательных значений кулоновых напряжений также существовала

в районе сочленения разломов Пазарджык и Амэнос к северу от первого сегмента очага (разлом Нарли). К северу от нее вдоль разлома Пазарджык имелся участок среднего и высокого уровня кулоновых напряжений.

Как следует из данных, опубликованных на сайте Геологической Службы США (<https://earthquake.usgs.gov>), развитие очага на первом сегменте продолжалось более 10 секунд с распространением фронта разрушения в большей части с юго-юго-запада на север—северо-восток. Здесь разрыв вначале распространялся с высокой скоростью, вскрывая участки высокого уровня кулоновых напряжений. В северной части разлома Нарли скорость распространения разрыва замедлилась, так как он вошел в пределы участка пониженных и даже отрицательных значений кулоновых напряжений. Это и зафиксировали расположенные здесь станции данными о наличии, с одной стороны, сверхвысоких скоростей поперечных волн, а с другой — видом импульсных волновых форм.

После этого начались сейсмические движения на втором сегменте очага. Здесь фронт разрушения распространялся вдоль разлома Пазарджык как на юго-запад, так и на северо-восток. Через 30 с после начала землетрясения возникли сейсмические движения на третьем сегменте очага, приходившемся на разломы Кирикхан и Амэнос. Здесь распространение фронта разрушения было в основном с север—северо-востока на юг—юго-запад.

Наличие рядом расположенных и практически субпараллельных сегментов в очаге Пазарджыкского землетрясения (первый и третий) должно приводить к изменению напряженного состояния после развития косейсмических движений в первом сегменте. Вопросы взаимного влияния близко расположенных разрывов рассматривались в работе [Осокина, Цветкова, 1979; Осокина и др., 1979]. В работах [Лермонтова, Ребецкий, 2012; Лермонтова, 2021] показано, какое их взаимное расположение будет способствовать активизации второго разрыва вслед за первым, поскольку увеличивает уровень кулоновых напряжений. Возможно также и такое их взаимное расположение, когда изменение напряженного состояния, вызванного активизацией первого разрыва, приведет к уменьшению уровня кулоновых напряжений и, следовательно, невозможности активизации второго разрыва.

На основании исследований А.С. Лермонтовой [Лермонтова, Ребецкий, 2012; Лермонтова, 2021] можно предположить, что изменение напряжений, произошедшее в результате косейсмических движений в окрестности первого сегмента очага Пазарджыкского землетрясения (рис. 13), привело к росту кулоновых напряжений во втором сегменте очага, которые до этого были положительными, но при невысокой их интенсивно-

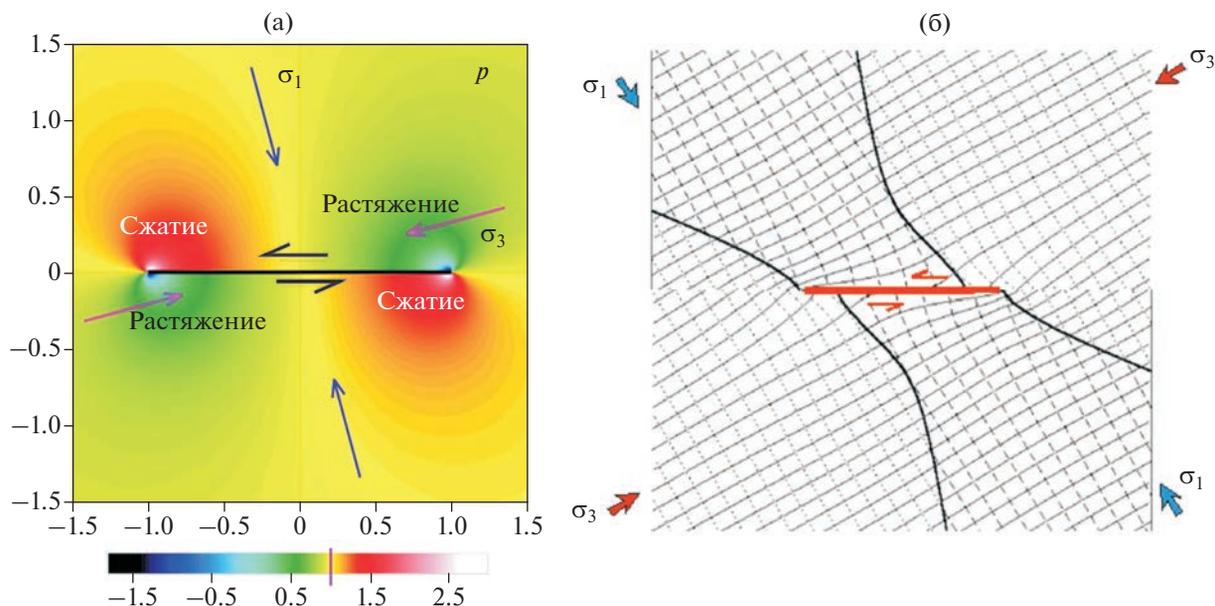
сти. Это способствовало началу сейсмических движений в нем, когда фронт разрушения, распространявшийся в первом сегменте, был наиболее близок ко второму сегменту очага.

Если бы расстояние между разрывами первого и второго сегментов очага Пазарджыкского землетрясения были бы несколько большим, возможно, что влияние активизации первого сегмента на второй могло быть не столь существенным. Тогда землетрясение завершилось бы, сформировав сейсмогенный разрыв только из первого сегмента. В этом случае магнитуда землетрясения могла ограничиться величиной 6.5 или несколько больше. Исследования изменений кулоновых напряжений для ВАЗР, выполненные в работе [Chen et al., 2023] численным моделированием, подтверждают наши выводы.

Перескок сейсмогенной опасности с одного разрыва на другой в случае их субпараллельности со смещением по простиранию — достаточно стандартное явление, исследованное в тектонофизическом эксперименте [Осокина и др., 1979]. Возникновение землетрясения с магнитудой 7.5 на разломе Сюрдю, имеющем существенно отличное простирание от восточной ветви ВАЗР, явление редкое. На этом разломе данные тектонофизического районирования показывают отрицательные значения кулоновых напряжений.

Во ВВЕДЕНИИ было обращено внимание, что очаг Эльбистанского землетрясения располагался в западном крыле северного — концевого участка второго сейсмогенерирующего сегмента очага Пазарджыкского землетрясения, а громадный 30-метровый провал поверхности протяженностью в несколько километров возник также вблизи концевого его участка (на юге), но уже восточного крыла, вблизи села Тепехан. Таким образом, второе сильное Эльбистанское землетрясение и “провал оливковой роши” по отношению к первому Пазарджыкскому землетрясению расположены в накрест лежащих секторах дополнительного растяжения, которые формируются в окрестности сейсмогенного разлома с большой компонентой левого сдвига (рис. 14а) [Осокина, Фридман, 1987]. В секторах, где в результате смещения по разлому наблюдается появление наибольшего дополнительного растяжения и сжатия, также происходит наибольшая перестройка ориентации осей главных напряжений (рис. 14б).

Таким образом, в результате Пазарджыкского землетрясения на огромных площадях земной коры произошла перестройка поля напряжений, обусловившая наблюдавшиеся после землетрясения явления. В этой связи при выполнении районирования территорий по сейсмической опасности необходимо учитывать фактор взаимодействия активизирующегося разлома с соседними, сопряженными с ним разломами.



**Рис. 14.** Расположение секторов сжатия и растяжения для дополнительного давления (а), возникающего в окрестности сейсмогенного разрыва с левым сдвигом, и траектории главных напряжений вблизи разрыва (б) согласно работам [Осокина, Фридман, 1987].

Проведенный анализ позволил ответить на большую часть вопросов, поставленных во ВВЕДЕНИИ. Его можно завершить следующим заключением. Основная часть сейсмогенерирующих разрывов двух сильнейших землетрясений не была подготовлена к генерации той магнитуды, которая в итоге им соответствовала. Без существования опасно высокого уровня кулоновых напряжений на опереющем разломе Нарли распределение этих напряжений на разломах Пазарджык и Амэнос могло генерировать землетрясения с магнитудами не более 6.5–7.0. В свою очередь без Пазарджыкского землетрясения Эльбистанское землетрясение вообще не могло произойти. Можно сказать, что при Караманмарашских землетрясениях имел место принцип домино, породивший каскадное перераспределение напряжений, направленное по наиболее неблагоприятному сценарию.

## ВЫВОДЫ

Согласно выполненному тектонофизическому мониторингу состояния коры Восточной Анатолии за период в 50–70 лет в ней происходили постепенные, медленные изменения напряженного состояния. В начальной стадии мониторинга, относящейся к началу нулевых годов, реконструкция напряжений показала, что большая часть коры имела обстановку горизонтального сдвига и лишь в южном секторе наблюдалось несколько небольших участков линейным размером 100–150 км с режимами горизонтального растяжения и горизонтального сжатия. В реконструкции на-

пряжений, имевшей место непосредственно перед двумя турецкими землетрясениями, произошедшими 06.02.2023 г, области коры с обстановкой горизонтального растяжения существенно расширились, охватив практически весь юго-западный сегмент ВАЗР. При этом граница перехода от режима горизонтального растяжения к горизонтальному сдвигу находилась вблизи эпицентра очага Пазарджыкского землетрясения.

Два сильнейших турецких землетрясения, произошедшие в провинции Караманмараш, развивались в разных напряженных состояниях, определявших опасность их сейсмогенной активности. Большая часть очага первого Пазарджыкского землетрясения имела положительные кулоновы напряжения, изменявшиеся в диапазоне от низких до высоких значений. Наибольший уровень этих напряжений отвечал первому сегменту очага (рис. 3а). При этом уровень максимальных касательных напряжений и всестороннего эффективного давления в очаге был невысок и имел большой разброс в значениях. Для Эльбистанского землетрясения уровень кулоновых напряжений на разломе до первого землетрясения с  $M_w = 7.8$  был всюду отрицательный.

Если рассматривать каждый из трех сегментов очага Пазарджыкского землетрясения отдельно, то согласно данным о протяженности участков разломов с высоким уровнем кулоновых напряжений могли возникнуть землетрясения с магнитудой 6.5–7.0. Но при этом в результате произошло землетрясение с магнитудой 7.8.

Это свидетельствует о том, что для систем активных разломов в период, когда отдельный их участок становится сейсмогенным — происходит землетрясение, имеет место резкая перестройка напряженного состояния, способная изменить весь ход сейсмического процесса. Это имело место как для первого — Пазарджыкского землетрясения, которое вместо землетрясения с магнитудой не более 7.0 (для первого сегмента очага) стало землетрясением 7.8, так и для второго — Эльбистанского землетрясения. При этом для первого землетрясения изменения напряжений и развитие землетрясения произошли в одно время, а для второго основные изменения напряженного состояния скорее всего возникли сразу после Пазарджыкского землетрясения, но при этом Эльбистанское землетрясение произошло через 9 часов после первого. Возможно, в этот период времени в зоне разлома накапливались дополнительные упругие деформации за счет афтершоков первого землетрясения и медленных асейсмических движений. Все это способствовало росту кулоновых напряжений на Эльбистанском разломе. Согласно взаиморасположению Эльбистанского разлома по отношению к простиранию очага Пазарджыкского землетрясения рост кулоновых напряжений скорее всего был связан с уменьшением нормальных к разлому напряжений сжатия, понизивших и напряжения трения на нем.

Выполненные исследования показывают высокую степень непредсказуемости возникновения сильнейших землетрясений, происходящих в зонах с густой и разнообразно ориентированной системой разломов. Когда землетрясение начинается в таких зонах, трудно предсказать, каким участком разлома оно ограничится. Здесь можно указывать области, опасные для возникновения землетрясений определенной минимальной магнитуды. При этом следует понимать, что взаимодействие активных разломов способно увеличить эту магнитуду. Подобные выводы показывают, почему методы прогноза могут давать как ложные тревоги, так и пропуск сильного землетрясения [Kossobokov et al., 2015].

Вероятно, для более качественного прогноза сейсмогенной активизации разломов необходимо комплексировать методы тектонофизики, направленные на изучение стационарного процесса изменения деформаций и напряжений в природном объекте, и методы геомеханики по численному моделированию напряжений в системах, развивающихся в динамической — сейсмической обстановке.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке РФФ, проект 22-27-00591.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бачманов Д.М., Кожурин А.И., Трифонов В.Г. База данных активных разломов Евразии // Геодинамика и тектонофизика. 2017. Т. 8. № 4. С. 711–736.
- Гарагаш И.А. Условия формирования регулярных систем полос сдвига и компакций // Геология и геофизика. 2006. Т. 47. № 5. С. 657–668.
- Гзовский М. В. Тектонофизическое обоснование геологических критериев сейсмичности // Изв. АН СССР. серия геофиз. 1957. № 2. С. 3.
- Гзовский М.В. Соотношение между тектоническими разрывами и напряжениями в земной коре // Разведка и охрана недр. 1956. № 11. С. 7–22.
- Гзовский М.В. Тектонические поля напряжений // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1954. № 3. С. 390–410.
- Гзовский М.В., Белоусов В.В. Тектонические условия и механизм возникновения землетрясений // Труды Геофиз. ин-та. 1954. № 25(152). С. 25.
- Гинтов О.Б., Исай В.М. Некоторые закономерности разломообразования и методика морфокинематического анализа сколовых разломов // Геофиз. журн. 1984. Т. 6. № 4. С. 3–14.
- Гусев А.А., Шумилина Л.С. Повторяемость сильных землетрясений Камчатки в шкале моментных магнитуд // Физика Земли. 2004. № 3. С. 34–42.
- Гущенко О.И. Кинематический принцип реконструкции направлений главных напряжений (по геологическим и сейсмологическим данным) // Докл. АН СССР. Сер. геоф. 1975. Т. 225. № 3. С. 557–560.
- Гущенко О.И. Метод кинематического анализа структур разрушения при реконструкции полей тектонических напряжений. Поля напряжений в литосфере. М.: Наука. 1979. С. 7–25.
- Добровольский И. П. Теория подготовки тектонического землетрясения. М. 1991. 224 с.
- Завьялов А.Д. Среднесрочный прогноз землетрясений. Основы, методика, реализация. Наука. 2006. 256 с.
- Кочарян Г.Г. Геомеханика разломов. 2017. М.: Геос. 424 с.
- Лермонтова А.С. Поле напряжений внутри зоны сдвига и образование магистрального разлома // Геодинамика и тектонофизика. 2021. Т. 12. № 3. С. 499–507.
- Лермонтова А.С., Ребецкий Ю.Л. Исследование взаимодействия трещин сдвига на основе приближенного аналитического решения задачи теории упругости // Геодинамика и тектонофизика. 2012. Т. 3. № 3. С. 239–274.  
<https://doi.org/10.5800/GT-2012-3-3-0073>
- Лю Цзяо, Рогожин Е.А. Макросейсмические проявления Веньчуаньского катастрофического землетрясения 2008 г. ( $M_s = 8.0$ ) по результатам изучения поверхностных сейсмодислокаций // Геофизические процессы и биосфера. 2017. № 14. Вып. 4. С. 103–121
- Макаров П.В., Смолин И.Ю., Стефанов Ю.П., Кузнецов П.В., Трубицын А.А., Трубицына Н.В., Ворошилов С.П., Ворошилов Я.С. Нелинейная механика геоматериалов и геосред. Новосибирск: изд-во “Гео”. 2007. 240 с.
- Никитин Л.В., Юнга С.Л. Определение главных осей и вида тензоров напряжений и деформаций по данным о сдвиговых смещениях; Измерение напряжений в мас-

- сивах горных пород. Новосибирск: СО ИГД СО АН СССР. Ч. 1. 1976. С. 22–26.
- Николаев П.Н.* Методика статистического анализа трещин и реконструкция полей тектонических напряжений // Изв. вузов. Геол. и разведка. 1977. № 12. С. 113–127.
- Николаев П.Н.* Методика тектонодинамического анализа. М.: Недра. 1992. 294 с.
- Николаевский В. Н.* Собрание трудов. Геомеханика. Том 3. Землетрясения и эволюция коры. Сквжины и деформации пласта. Газоконденсат. М.-Ижевск: НИЦ “Регулярная и хаотическая динамика”. Институт компьютерных исследований. 2012. 644 с.
- Николаевский В.Н.* Собрание трудов. геомеханика. Т. 1. Разрушение и дилатансия. Нефть и газ. М.- Ижевск: НИЦ “Регулярная и хаотическая динамика”. Институт компьютерных исследований. 2010. 640 с.
- Николаевский В.Н.* Собрание трудов. Геомеханика. Том 2. Земная кора. Нелинейная сейсмика. Вихри и ураганы. М.-Ижевск: НИЦ “Регулярная и хаотическая динамика”, Институт компьютерных исследований. 2010. 560 с.
- Осокина Д. Н., Цветкова Н. Ю.* Изучение локального поля напряжений и прогноз вторичных нарушений в окрестностях тектонических разрывов и в очагах землетрясений с учетом третьего главного напряжения. Поля напряжений и деформаций в литосфере. М.: Наука. 1979. С. 163–184.
- Осокина Д.Н.* Взаимосвязь смещений по разрывам с тектоническими полями напряжений и некоторые вопросы разрушения горного массива. Поля напряжений и деформаций в земной коре. М.: Наука. 1987. С. 120–135.
- Осокина Д.Н., Никонов А.А., Цветкова Н.Ю.* Моделирование локального поля напряжений системы разломов Сан-Андреас. Поля напряжений и деформаций в литосфере. М.: Наука. 1979. С. 204–226.
- Осокина Д.Н., Фридман В.Н.* Исследование закономерностей строения поля напряжений в окрестностях сдвигового разрыва с трением между берегами. Поля напряжений и деформаций в земной коре. М.: Наука. 1987. С. 74–119.
- Павленко О.В., Павленко В.А.* Эффекты направленности излучения крупных очагов на примере катастрофических землетрясений в Турции 06.02.2023 г. // Физика Земли. 2023. № 6. С. 103–121.
- Парфенов В.Д.* Анализ напряженного состояния в ангидридовых тектонитах // Докл. АН СССР. 1981. Т. 260. № 3. С. 695–698.
- Парфенов В.Д.* К методике тектонофизического анализа геологических структур // Геотектоника. 1984. № 1. С. 60–72.
- Расцветаев Л.М.* Парагенетический метод структурного анализа дизъюнктивных тектонических нарушений // Проблемы структурной геологии и физики тектонических процессов. М.: ГИН АН СССР. 1987. С. 173–235.
- Расцветаев Л.М.* Структурные рисунки трещиноватости и их геомеханическая интерпретация // Докл. АН СССР. 1982. Т. 267. № 4. С. 904–909.
- Ребецкий Ю.Л.* Закономерности разномасштабного разрывообразования в коре и тектонофизические признаки метастабильности разломов // Геодинамика и тектонофизика 2018. Т 9. Вып. 3. С. 629–652. <https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-3-0365>
- Ребецкий Ю.Л.* Методы реконструкции тектонических напряжений и сейсмотектонических деформаций на основе современной теории пластичности // Докл. РАН. 1999. Т. 365. № 3. С. 392–395
- Ребецкий Ю.Л.* Напряженно-деформированное состояние и механические свойства природных массивов по данным о механизмах очагов землетрясений и структурно-кинематическим характеристикам трещин. Автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. М.: ОИФЗ. 2003. 56 с.
- Ребецкий Ю.Л.* Напряженное состояние земной коры Курил и Камчатки перед Симуширскими землетрясениями // Тихоокеанская геология. 2009. Т. 28. № 5. С. 70–84.
- Ребецкий Ю.Л.* Об особенностях напряженного состояния коры внутриконтинентальных орогенов // Геодинамика и тектонофизика. 2015. Т. 6. Вып. 4. С. 437–466. <http://dx.doi.org/10.5800/GT-2015-6-4-0189>
- Ребецкий Ю.Л.* Развитие метода катакластического анализа сколов для оценки величин тектонических напряжений // Докл. РАН. 2003. Т 400. № 3. С. 237–241.
- Ребецкий Ю.Л., Guo Y., Wang K., Алексеев Р.С., Маринин А.В.* Напряженное состояние земной коры и сейсмотектоника Западного Сычуаня, Китай // Геотектоника. 2021. № 6. С. 75–97. [Rebetsky Yu. L., Guo Ya., Wang K., Alekseev R.S., Marinin A.V. Stress State of the Earth’s Crust and Seismotectonics of Western Sichuan, China // Geotectonics. 2021. V. 55. № 6. P. 844–863.]
- Ребецкий Ю.Л., Guo Y., Wang K., Алексеев Р.С., Маринин А.В.* Напряженное состояние земной коры и сейсмотектоника Западного Сычуаня, Китай // Геотектоника. 2021. № 6. С. 75–97.
- Ребецкий Ю.Л., Кузиков С.И.* Тектонофизическое районирование активных разломов Северного Тянь-Шаня // Геология и геофизика. 2016. Т. 57. № 6. С. 1225–1250.
- Ребецкий Ю.Л., Маринин А.В.* Поле тектонических напряжений до Суматра-Андаманского землетрясения 26.12.2004. Модель метастабильного состояния горных пород // Геология геофизика. 2006. Т 47. № 11. С. 1192–1206.
- Семинский К.Ж.* Внутренняя структура континентальных разломных зон. Тектонофизический аспект. Новосибирск: изд-во СО РАН, фил. ГЕОС. 2003. 241 с.
- Сим Л.А.* Неотектонические напряжения Восточно-европейской платформы и структур обрамления. Автореф. Дис. ... д-ра геол.-минерал.наук. М.: МГУ. 1996. 41 с.
- Соболев Г.А.* Основы прогноза землетрясений. М.: Наука. 1993. 313 с.
- Стефанов Ю.П., Бакеев Р.А.* Формирование цветковых структур нарушений в слое геосреды при разрывном горизонтальном сдвиге основания // Физика Земли. 2015. № 4. С. 81–93.
- Тихоцкий С.А., Татевосян Р.Э., Ребецкий Ю.Л., Овсюченко А.Н., Ларьков А.С.* Караманмарашские землетрясения 2023 г. в Турции: сейсмическое движение по сопряженным разломам // Докл. РАН. 2023. № 6. С. 00-00.
- Уломов В.И.* Сейсмогеодинамика и сейсмическое районирование Северной Евразии // Вулканология и сейсмология. 1999. № 4–5. С. 6–22.

- Уломов В.И., Шумилина Л.С. Комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации – ОСР-97. Масштаб 1 : 8000000. Объяснительная записка и список городов и населенных пунктов, расположенных в сейсмоопасных районах. М.: ОИФЗ. 1999. 57 с
- Федотов С.А. Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги. М.: Наука. 2005. 302 с.
- Федотов С.А. О сейсмическом цикле, возможности количественного сейсмического районирования и долгосрочном сейсмическом прогнозе. Сейсмическое районирование СССР. М.: Наука. 1968. С. 121–150.
- Федотов С.А., Соломатин А.В. Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги на IV 2016–III 2021 гг., его развитие и применение; особенности сейсмичности Курило-Камчатской дуги до и после глубокого Охотоморского землетрясения 24.V 2013 г.,  $M = 8.3$  // Вулканология и сейсмология. 2017. № 3. С. 3–21.
- Черных К.Ф. Введение в анизотропную упругость. М.: Наука. 1988. 190 с.
- Юнга С.Л. Методы и результаты изучения сейсмоструктурных деформаций. М.: Наука. 1990. 190 с.
- Юнга С.Л. О механизме деформирования сейсмоактивного объема земной коры // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1979. № 10. С. 14–23.
- Abdelmeguid M., Zhao Ch., Yalcinkaya E., Gazetas G., Elbanna A., Rosakis A. Revealing the dynamics of the Feb 6th 2023  $M_{7.8}$  Kahramanmaraş/Pazarcik earthquake: near-field records and dynamic rupture modeling. 2023. Preprint. <https://doi.org/10.31223/X5066R>
- Aleksandrowski P. Graphical determination of principal stress directions for slicken side lineation populations: an attempt to modify Arthaud's method // J. Struct. Geol. 1985. № 7. P. 73–82.
- Allen C.R. Active faulting in northern Turkey. Rep. Div. of Geol. Sic., Calif. Inst. of Technol., Pasadena. 1969. V. 1577. 32 p.
- Anderson E.M. The Dynamics of Faulting and Dyke Formation with Applications to Britain, Oliver and Boyd, Edinburgh. 1951.
- Angelier J. From orientation to magnitude in paleostress determinations using fault slip data // J. Struct. Geol. 1989. V. 11. № 1/2. P. 37–49.
- Angelier J. Inversion field data in fault tectonics to obtain the regional stress - III. A new rapid direct inversion method by analytical means // Geophys. J. Int. 1990. V. 10. P. 363–367.
- Angelier J. Sur l'analyse de mesures recueillies dans des sites failles: l'utilité d'une confrontation entre les methodes dynamiques et cinematiques // C. R. Acad. Sci. Paris. D. 1975. V. 281. P. 1805–1808.
- Arthaud F. Methode de determination graphique des directions de raccourcissement, d'allongement et intermediaire d'une population de failles // Bul. Soc. geol. Fr. 1969. V. 7. P. 729–737.
- Baltzopoulos G., Baraschino R., Chioccarelli E., Cito P., Iervolino I. Preliminary engineering report on ground motion data of the Feb. 2023 Turkey seismic sequence V2.0 – 10/02/2023.
- Bott M.H.P. The mechanics of oblique slip faulting // Geol. Mag. 1959. № 96. P. 109–117.
- Baez J.I., Miranda E. Amplification Factors to Estimate Inelastic Displacement Demands for the Design of Structures in the Near Field. Proc. of 12th World Conference on Earthquake Engineering. 2000.
- Barbot S., Luo H., Wang T., Hamiel Y., Piatibratova O., Javed M.T., Braitenberg C., Gurbuz G. Slip distribution of the February 6, 2023  $M_w$  7.8 and  $M_w$  7.6, Kahramanmaraş, Turkey earthquake sequence in the East Anatolian Fault Zone. Preprint. <https://doi.org/10.26443/seismica.v2i3.502>
- Carey E., Bruneier B. Analyse theorique et numerique d'un modele mecanique elementaire applique a l'etude d'une population de failles // C.R. Acad. Sci. Paris. D. 1974. V. 279. P. 891–894.
- Chen J., Zilio L.D., Zhang H., Yang G., Shi Y., Liu C. Decoding stress patterns of the 2023 Turkey-Syria earthquake doublet // Research Square. 2023. Preprint. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2922091/v1>
- Davis C., Keilis-Borok V., Kossobokov V., Soloviev A. Advance prediction of the March 11, 2011 Great East Japan Earthquake: A missed opportunity for disaster preparedness // International J. Disaster Risk Reduction. 2012. V. 1. P. 17–32.
- Duman T., Emre O. The East Anatolian Fault: geometry, segmentation and jog characteristics / Robertson A. H. F., Parlak O., Unlugenc U. C. (eds.). Geological Development of Anatolia and the Easternmost Mediterranean Region. Geological Society. 2013. London: Special Publications. 372 p. <https://doi.org/10.1144/SP372.14>
- Ferrill D.A., Morris A.P. Dilational normal faults // J. Structural Geology. 2003. V. 25. P. 183–196.
- Ganas A., Sokos E., Agalos A., Leontakianakos G., Pavlides S. Coulomb stress triggering of earthquakes along the Atalanti Fault, central Greece: Two April 1894  $M_6+$  events and stress change patterns // Tectonophysics. 2006. V. 420. P. 357–369.
- 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. № B11. P. 9305–9320.
- Giardini D., Danciu L., Erdik M., Şeşetyan K., Demircioğlu Tümsa M.B., Akkar S., Gülen L., Zare, M. Seismic hazard map of the Middle East // Bulletin of Earthquake Engineering, 2018. V. 16. № 8. P. 3567–3570. <https://doi.org/10.1007/s10518-018-0347-3>
- Güvercin S.E., Karabulut H., Konca. A.Ö., Doğan U., Ergintav S. Active Seismotectonics of the East Anatolian Fault // Geoph. J. Int. 2023. V. 230. № 1. <https://doi.org/10.1093/gji/ggac045>
- Harris R.A., Simpson R.W., Reseanberg P.A. Influence of static stress changes on earthquake locations in southern California. Nature. 1995. V. 375. P. 221–224
- Heidbach O., Tingay M., Barth A., Reinecker J., Kurfe D., Müller B. Global crustal stress pattern based on the World Stress Map database release 2008 // Tectonophysics. 2010. V. 482. P. 3–15. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2009.1007.1023>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2018.07.007>
- Ismail-Zadeh A., Kossobokov V. Earthquake Prediction, M8 Algorithm // *Encyclopedia of Solid Earth Geophysics, Encyclopedia of Earth Sciences Series*. 2020. P. 1–5. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-10475-7\\_157-1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-10475-7_157-1)
- King G.C.P., Stein R.S., Lin J. Static stress changes and the triggering of earthquakes // *Revised for Bull. Seismol. Soc. Am.* 1994. V. 84. № 3. P. 935–953.
- Kivinen A. ja Varis K. Jännitystilamittaukset hydraulisen murtuman menetelmällä Pyhäjoella 2009. Raportti 223/2934 III/09/AK, KV. Suomen Malmi Oy, Espoo. 8 p.
- Kossobokov V.G., Peresan A., Panza G. On Operational Earthquake Forecast and Prediction Problems // *Seismological Research Letters*. 2015. V. 86. № 2. P. 287–289.
- Kossobokov V.G. Quantitative earthquake prediction on global and regional scales. Recent geodynamics, georisk and sustainable development in the Black Sea to Caspian Sea region / Ismail-Zadeh A. (ed.). *American institute of physics conference proceedings*. V. 825. New York: Melville. 2006. P. 32–50.
- Kossobokov V.G. Quantitative Earthquake Prediction: Twenty Years of Real-Time Application and Testing, presentation, available at: /[www.lmd.ens.fr/E2C2/class/e2c2@Comorova.pptS](http://www.lmd.ens.fr/E2C2/class/e2c2@Comorova.pptS) [accessed April 25, 2007].
- Kwiatek G., Martínez-Garzón P., Becker D., Dresen G., Cotton F., Beroza G., Acarel D., Ergintav S., Bohnhoff Marco., Months-long preparation of the 2023 MW 7.8 Kahramanmaraş earthquake, Türkiye // *Research Square*. 2023. Preprint. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2657873/v1>
- Lisle R. New method of estimating regional stress orientations: application to focal mechanism data of recent British earthquakes // *Geoph. J. Int.* 1992. V. 110. P. 276–282.
- Lisle R. Principal stress orientation from faults: an additional constrain // *Ann. Tectonicae*. 1987. № 1. P. 155–158.
- Lund B., Townend J. Calculating horizontal stress orientations with full or partial knowledge of the tectonic stress tensor // *Geophys. J. Intern.* 2007. V. 170. P. 1328–1335.
- Mallman E.P., Zoback M.D. Assessing elastic Coulomb stress transfer models using seismicity rates in southern California and southwestern Japan // *J. Geophysical Research Solid Earth*. 2007. V. 112(B3).
- Melgar D., Crowell B., Melbourne T., Szeliga W., Santillan M., Scrivner C. Noise Characteristics of Operational Real-Time High-Rate GNSS Positions in a Large Aperture Network // *J. Geoph. Research: Solid Earth*. 2020. V. 125. № 7. <https://doi.org/10.1029/2019JB019197>
- Michael A.J. Determination of stress from slip data: faults and folds // *J. Geophys. Res.* 1984. V. 89. № B13. P. 11517–11526.
- Morris A., Ferrill D.A., Henderson D.B. Slip tendency analysis and fault reactivation // *Geology* 1996. V. 24. № 3. P. 275–278.
- Okada Y. Internal deformation due to shear and tensile faults in a halfspace // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1992. V. 82. P. 1018–104
- Okuwaki R., Yagi Yu., Taymaz T., Hicks S.P. Multi-scale rupture growth with alternating directions in a 2 complex fault network during the 2023 south-eastern 3 Türkiye and Syria earthquake doublet // *Geoph. Res. Lett.* 2023. Preprint. <https://doi.org/10.31223/X5RD4W>
- Pang Y. Stress evolution on major faults in Tien Shan and implications for seismic hazard // *Journal of Geodynamics* 2022. № 2. P. 153–154. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2022.101939>
- Pohjatekniikka FH1.C.T036.002.HG.1001.E Technical report for engineering geological investigations to develop design documents of Hanhikivi-1 NPP. Stage 1. Rev.1, March 2018a.
- Pohjatekniikka FH1.C.T036.002.HG.2001.E Technical report for engineering geological investigations to develop design documents of Hanhikivi-1 NPP. Stage 2.1. Rev 1. April 2018b. FH1-00052632.
- Pohjatekniikka. FH1.C.T036.002.HG.3001.E Technical report for engineering geological investigations to develop design documents of Hanhikivi-1 NPP. Stage 2.2. dated June. 2018b. DRAFT.
- Rebetsky Y.L., Guo Y.S. From natural stresses in seismic zones to predictions of megaequake nucleation zones // *Pure Appl. Geophys.* 2020. V. 177. P. 421–440. <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02128-0>
- Rebetsky Yu.L., Polets A. Yu. The method of cataclastic analysis of discontinuous displacements. *Moment Tensor Solutions - A Useful Tool for Seismotectonics* / Sebastiano D'Amico (ed.). Springer. Cham. 2018. P. 111–162. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-77359-9\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-319-77359-9_6)
- Rebetsky Yu.L., Polets A. Yu., Kuchay O.A., Sycheva N.A. The stress state of seismic areas of the Central and Eastern Asia. *Moment Tensor Solutions - A Useful Tool for Seismotectonics* / Editor Sebastiano D'Amico. Springer. Cham 2018. P. 519–556. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-77359-9\\_23](https://doi.org/10.1007/978-3-319-77359-9_23)
- Reches Z. Analysis of faulting in three-dimensional strain field // *Tectonophysics*. 1978. V.47. P. 109–129.
- Reches Z. Determination of the tectonic stress tensor from slip along faults that obey the Coulomb yield condition // *Tectonics*. 1987. № 6. P. 849–861.
- Reches Z. Faulting of rock in three dimensional strain fields. II Theoretical analysis // *Tectonophysics*. 1983. V. 95. P. 133–156.
- Reid H.F. The mechanism of the earthquake. The California earthquake of April 18, 1906. Rep. of the state investigation commiss. 1910. Washington. V. 2. 56 p.
- Reilinger R., McClusky S., Vernant Ph. et al. GPS constraints on continental deformation in the Africa–Arabia–Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions // *J. Geophys. Res.* 2006. V. 111. P. B05411. <https://doi.org/10.1029/2005JB004051>
- Rice J. The Mechanics of Earthquake Rupture. *Physics of the Earth's Interior* / A. Dziewonski, E. Boschi (eds.). Amsterdam: Elsevier. 1982. P. 555–649.
- Richter C.F. *Elementary seismology*. W. H. Freeman and Company. San Francisco and Bailey Bros. & Swinfen Ltd. London. 1958. 768 p.
- Rosakis A., Samudrala O., Coker D. Cracks faster than the shear wave speed // *Science*. 1999. V. 284. № 5418. P. 1337–1340.
- Shahi S., Baker J. An empirically calibrated framework for including the effects of near-fault directivity in probabilistic

- seismic hazard analysis // Bull. Seismol. Soc. Am. 2011. V. 101. № 2. P. 742–755.  
<https://doi.org/10.1785/0120100090>
- Somerville P., Smith N., Graves R., Abrahamson N.* Modification of Empirical Strong Ground Motion Attenuation Relations to Include the Amplitude and Duration Effects of Rupture Directivity // Seismol. Res. Lett. 1997. V. 68. № 1. P. 199–222.  
<https://doi.org/10.1785/gssrl.68.1.199>
- Stein R.S., King G.C.P., Lin J.* Change in failure stress on the southern 636 San Andreas fault system caused by the 1992 magnitude = 7.4 Landers earthquake // Science. 1992. V. 258. № 5086. P. 1328–1332.
- Sunbul F.* Time-dependent stress increase along the major faults in eastern Turkey // Journal of Geodynamics. 2019. V. 126. P. 23–31.  
<https://doi.org/10.1016/j.jog.2019.03.001>
- Taymaz T., Eyidoğan H., Jackson J.* Source Parameters of large earthquakes in the East Anatolian Fault Zone (Turkey) // Geophysical J. Int. 1991 V. 106. P. 537–550.  
<https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1991.tb06328.x>
- Taymaz T., Ganas A., Yolsal-Çevikbilen S., Vera F., Eken T., et al.* Source Mechanism and Rupture Process of the 24 January 2020 Mw 6.7 Doğanyol-Sivrice Earthquake obtained from Seismological Waveform Analysis and Space Geodetic Observations on the East Anatolian Fault Zone (Turkey) // Tectonophysics. 2021. V. 804. TECTO14240–228745.  
<https://doi.org/10.1016/j.tecto.2021.228745>
- Technical report for engineering geological investigations to develop design documents of Hanhikivi-1 NPP. Stage 1. Rev 1. March 2018.
- Trifonov V.G., Çelik H., Simakova A.N., Bachmanov D.M., Frolov P.D., Trikhunkov Y.I., Tesakov A.S., Titov V.M., Lebedev V.A., Ozherelyev D.V., Latyshev A.V., Sychevskay E.K.* Pliocene–Early Pleistocene history of the Euphrates valley applied to Late Cenozoic environment of the northern Arabian Plate and its surrounding, eastern Turkey // Quat. Int., 2018. V. 493. P. 137–165.
- Wallace R.E.* Geometry of shearing stress and relation to faulting // J. Geol. 1951. № 59. P. 118–130.
- Yin A., Freymueller J.T., Keller G.R., Ni S.D., Song X.D.* The Great Wenchuan Earthquake ( $M_w = 7.9$ ) on 12 May 2008, China // Tectonophysics. 2010. V. 491. № 1–4. P. 1–276.
- Zoback M.L.* First- and second modern pattern of stress in lithosphere: The World stress map project // J. Geophys. Res. 1992. V. 97. № B8. P. 11703–11728.

## Tectonophysical Zoning of Seismogenic Faults in Eastern Anatolia and February 6, 2023 Kahramanmaraş Earthquakes

Yu. L. Rebetsky\*

*Schmidt Institute of Physics of the Earth, Moscow, 123242 Russia*

\*e-mail: reb@ifz.ru

**Abstract**—The results of the tectonophysical reconstruction of stresses in the crust of Eastern Anatolia, obtained from the analysis of data on earthquake focal mechanisms, have shown that a significant restructuring of the stress state has occurred here in the last 20 years. It was largely confined to the southern and southwestern sectors of the region, covering hundreds of kilometers along the East Anatolian Fault. The data obtained from tectonophysical monitoring not only on the orientation of principal stresses, but also on their normalized values made it possible to calculate Coulomb stresses on faults. The results of fault zoning by intensity and sign of these stresses helped identify both hazardous sections close to the limit state and safe sections with negative Coulomb stress values. It has been established that in the region of the source of the first strong Pazarcık earthquake, which had a complex structure (three segments), there were extended sections with a critically high Coulomb stress level, separated by zones with low and even negative values of these stresses. The epicenter of this earthquake was located on the echelon fault within a section (first segment) with a high Coulomb stress level. The source of the second strong Elbistan earthquake was located on a fault with negative Coulomb stresses. The conducted analysis shows that this second Turkey earthquake may have been caused by stress changes that occurred in the crust of the region after the first strong earthquake. The research results show that Coulomb stresses in systems of closely located and differently oriented faults may be prone to sudden changes during the development of the earthquake on one of hazardous sections.

*Keywords:* active faults, earthquake source, Coulomb stresses, tectonophysical zoning