

Ю.Л. РебецкийИнститут физики Земли РАН, г. Москва, Россия
e-mail: reb@ifz.ru

ОБ АКТУАЛЬНОСТИ И ВОЗМОЖНОСТИ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ НА ТЯНЬ-ШАНЕ

Рассмотрена проблема активизации сейсмического режима Тянь-Шаня и возможности возникновения в ближайшие несколько лет сильных землетрясений в его южных и северных предгорьях в связи с землетрясением 23 января 2024 г., произошедшего в южных предгорьях Центрального Тянь-Шаня в уезде Уши (Уктурпан) префектуры Аксу провинции Синьцзян КНР недалеко от города Аксу произошло землетрясение магнитудой 7.1. Произошедшее Ушинское землетрясение 23.01.2024 г может означать начало новой сейсмической активизации Тянь-Шаня. Здесь предыдущий цикл из восьми сильнейших землетрясений с $M=6.9-8.3$ в северных и шести с $M=6.8-7.8$ в южных предгорьях Тянь-Шаня, продолжавшийся 100 лет, начавшийся в 1885 году с Беловодского землетрясения ($M=6.9$ вблизи г. Бишкек) и закончившийся Кашгарским ($M=7.0$) в 1985 г. Было еще одно сильное Суусамырское землетрясение с $M=7.3$ в 1992 г в срединной части Тянь-Шаня, что является нетипичным в этом регионе. С землетрясением Уши закончился период затишья для землетрясений с магнитудами 7.0 и более, длившийся почти 40 лет.

Дан краткий обзор современного состояния вопроса по прогнозу сильных землетрясений. Отмечено, определенное несоответствие базовых представлений существующих моделей очага землетрясений и имеющихся геомеханических данных о хрупком разрушении горных пород.

Представлены последние достижения тектонофизики в области изучения современного напряженного состояния непосредственно в массивах горных пород. Показана возможность по результатам тектонофизической реконструкции природных напряжений выполнить районирование активных разломов по уровню кулоновых напряжений, отвечающих за реализацию хрупкого разрушения. Дан анализ результатов районирования активных разломов, выполненный в очагах сильного Веньчуаньского землетрясения ($M=8.0$, 2008 г) и Карамуширского землетрясения ($M=7.8$, 2023 г.).

Выполнен анализ возможностей осуществить долгосрочный и краткосрочный прогноза на основе комплекса сейсмических, сейсмотектонических и геофизических методов, опирающихся на результаты тектонофизического районирования активных разломов.

Ключевые слова: сейсмическая опасность, активные разломы, очаг землетрясения.

Yu.L. Rebetskii

Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
e-mail: reb@ifz.ru

On the relevance and possibility of preventing seismic hazards in the Tien Shan

The problem of activation of the seismic regime of the Tien Shan and the possibility of strong earthquakes in its southern and northern foothills in the next few years in connection with the earthquake of January 23, 2024, which occurred in the southern foothills of the Central Tien Shan in Ushi County (Ukturpan) of Aksu Prefecture of Xinjiang Province of the People's Republic of China, an earthquake of magnitude 7.1 occurred near the city of Aksu. The Ushinsky earthquake of 23.01.2024 may mean the beginning of a new seismic activation of the Tien Shan. Here is the previous cycle of eight strongest earthquakes with $M=6.9-8.3$ in the northern and six with $M=6.8-7.8$ in the southern foothills of the Tien Shan, which lasted 100 years, began in 1885 with the Belovodsky earthquake ($M=6.9$ near Bishkek) and ended with the Kashgar earthquake ($M=7.0$) in 1985. There was another strong Suusamyr earthquake with $M=7.3$ in 1992 in the middle part of the Tien Shan, which is atypical in this region. With the earthquake of Usha, the period of calm for earthquakes with magnitudes 7.0 and more, which lasted for almost 40 years, ended.

A brief overview of the current state of the issue of forecasting strong earthquakes is given. It is noted that there is a certain discrepancy between the basic concepts of the existing earthquake source models and the available geomechanical data on the fragile destruction of rocks.

The latest achievements of tectonophysics in the field of studying the current stress state directly in rock massifs are presented. It is shown that, based on the results of tectonophysical reconstruction of natural stresses, it is possible to perform zoning of active faults according to the level of coulomb stresses responsible for the implementation of brittle fracture. The analysis of the results of active fault zoning performed in the foci of the strong Wenchuan earthquake ($M=8.0$, 2008) and the Karamushir earthquake ($M=7.8$, 2023) is given.

The analysis of the possibilities for long-term and short-term forecasting based on a complex of seismic, seismotectonic and geophysical methods based on the results of tectonophysical zoning of active faults is performed.

Key words: seismic hazard, active faults, earthquake source.

Ю.Л. Ребецкий

РФА Жер физикасы институты, Мәскеу қ., Ресей
e-mail: reb@ifz.ru

Тянь-Шаньдағы сейсмикалық қауіптің өзектілігі мен алдын алу мүмкіндігі туралы

Тянь-Шань сейсмикалық режимін жандандыру және алдағы бірнеше жылда оның оңтүстік және солтүстік тау бөктерінде 2024 жылғы 23 қаңтардағы Орталық Тянь-Шаньның оңтүстік бөктерінде орын алған жер сілкінісіне байланысты қатты жер сілкіністерінің туындау мүмкіндігі мәселесі қаралды. 23.01.2024 ж. үшін жер сілкінісі Тянь-Шаньның жаңа сейсмикалық белсенділігінің басталуын білдіруі мүмкін. Мұнда солтүстігінде $M=6.9-8.3$ және Тянь-Шаньның оңтүстік бөктерінде алты $M=6.8-7.8$ болатын сегіз ірі жер сілкінісінің алдыңғы циклі 1885 жылы Беловод жер сілкінісінен басталған 100 жылға созылды ($M=6.9$ жақын) Бішкек және 1985 жылы Қашғармен аяқталды ($M=7.0$). 1992 жылы Тянь-Шаньның орта бөлігінде $M=7.3$ болатын тағы бір үлкен Суусамыр жер сілкінісі болды, бұл аймақта типтік емес. Құлақ жер сілкінісімен 40 жылға жуық уақытқа созылған 7.0 немесе одан да көп баллдық жер сілкінісі үшін тыныштық кезеңі аяқталды.

Үлкен жер сілкіністерін болжау бойынша мәселенің қазіргі жағдайына қысқаша шолу жасалды. Жер сілкінісі ошағының қолданыстағы модельдерінің және тау жыныстарының сынғыш бұзылуы туралы қолда бар геомеханикалық деректердің базалық көріністерінің белгілі бір сәйкессіздігі атап өтілді.

Тектонофизиканың қазіргі шиеленісті күйді тау жыныстарының массивтерінде зерттеу саласындағы соңғы жетістіктері ұсынылған. Табиғи кернеулерді тектонофизикалық реконструкциялау нәтижелері бойынша сынғыш бұзылуды жүзеге асыруға жауап беретін кулондық кернеулер деңгейі бойынша белсенді ақауларды аудандастыру мүмкіндігі көрсетілген. Күшті Вэнчуань жер сілкінісі ($M=8.0$, 2008 ж) және Карамушир жер сілкінісі ($M=7.8$, 2023 ж.) ошақтарында орындалған белсенді ақауларды аудандастыру нәтижелеріне талдау жасалды.

Белсенді ақауларды тектонофизикалық аудандастыру нәтижелеріне сүйенетін сейсмикалық, сеймотектоникалық және геофизикалық әдістер кешені негізінде ұзақ мерзімді және қысқа мерзімді болжамды жүзеге асыру мүмкіндіктеріне талдау жасалды.

Түйін сөздер: сейсмикалық қауіп, белсенді ақаулар, жер сілкінісінің ошағы.

Введение

23 января 2024 г. в южных предгорьях Центрального Тянь-Шаня в уезде Уши (Уктурпан) префектуры Аксу провинции Синьцзян КНР недалеко от города Аксу произошло землетрясение магнитудой 7.1. О значимых разрушениях и жертвах в китайской открытой печати не сообщалось. Это связано с тем, что в районе землетрясения сколь либо крупных городов и промышленных объектов не было. В то же время в Алматы и Бишкеке, имеющих здания высокой этажности и находящиеся на

расстоянии около 200 км от эпицентра Ушинского землетрясения, сотрясаемость земной поверхности определена в 5-6 баллов.

Поскольку вблизи этих столиц двух государств, занимающих большие площади Тянь-Шаня, в недавнем прошлом, происходили сильные землетрясения, то это землетрясение напомнило о необходимости разработки мер оперативного и научно обоснованного предупреждения сейсмической опасности. Эта проблема в регионе стала вновь крайне актуальной.

Произошедшее Ушинское землетрясение 23.01.2024 г может означать начало новой

сейсмической активизации Тянь-Шаня. Здесь предыдущий цикл из восьми сильнейших землетрясений с $M=6.9-8.3$ в северных и шести с $M=6.8-7.8$ в южных предгорьях Тянь-Шаня, продолжавшийся 100 лет, начавшийся в 1885 году с Беловодского землетрясения ($M=6.9$ вблизи г. Бишкек) и закончившийся Кашгарским ($M=7.0$) в 1985 г (рисунок 1).

Было еще одно сильное Суусамырское землетрясение с $M=7.3$ в 1992 г в срединной части Тянь-Шаня, что является нетипичным в этом

регионе. С землетрясением Уши закончился период затишья для землетрясений с магнитудами 7.0 и более, длившийся почти 40 лет.

Эпицентры очагов Вернинского (1887 г, $M=7.3$) и Беловодского (1885 г, $M=6.9$) землетрясений были наиболее близко расположены к центрам современных столиц Алматы и Бишкека (на расстояниях соответственно 18 км и 54 км). Максимальная сотрясаемость поверхности в эпицентральной области составляла для этих землетрясений 9-10 баллов.

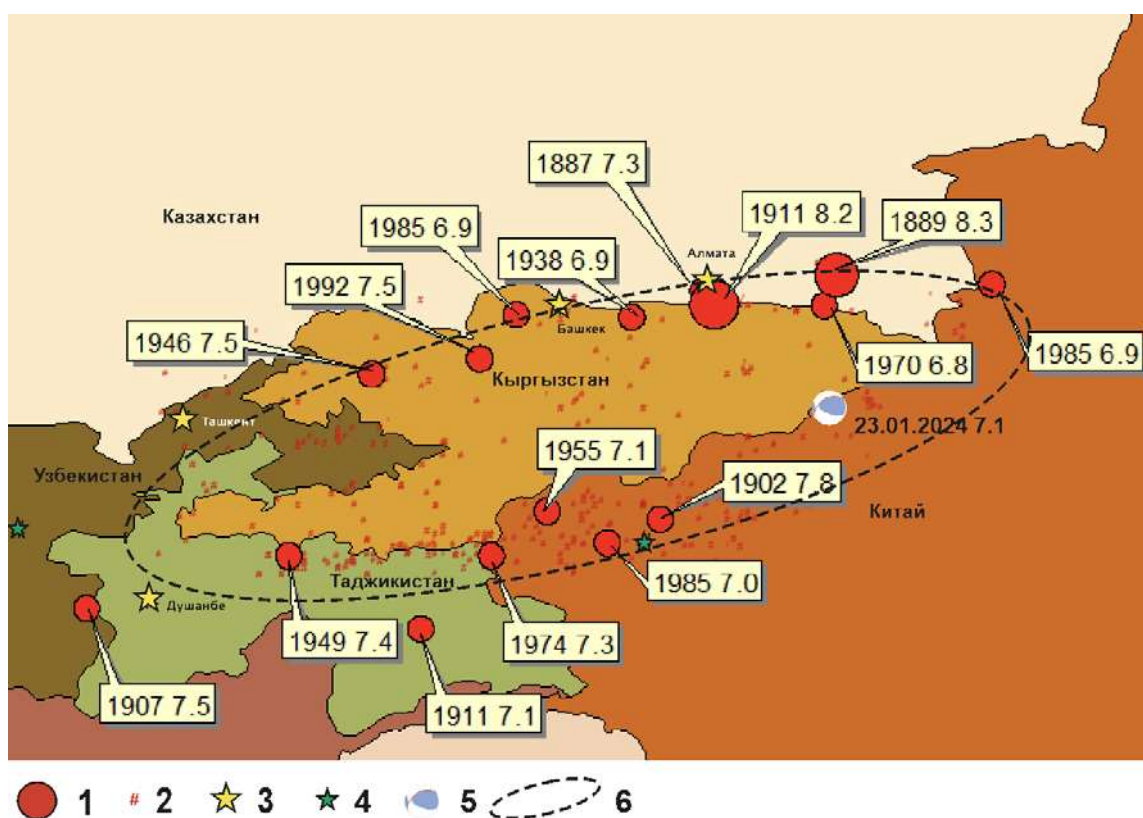


Рисунок 1 – Эпицентры сильных землетрясений Тянь-Шаня, Гиссаро-Алая и Памира за последние 250 лет, в иконке к сильным землетрясениям указан год и магнитуда события. 1 – Эпицентры сильных землетрясений с $M>6.9$; 2 – эпицентры землетрясений с $M>5.0$; 3 – столицы государств; 4 – крупные города; 5 – землетрясения Уши 23.01.2024; 6 – область горного Тянь-Шаня

В селах Беловодское и Сукулук, расположенном к востоку на расстоянии 17 км, в то время жило соответственно 742 и 335 человек. В Беловодске погибло от обрушения зданий 37 человек (около 5% населения), ранено – 43. В г. Кара-Балта, расположенном к западу от Беловодска на расстоянии 23 км, погибло 17 человек, ранено – 20. Дома почти все разрушены, в том числе училище и часть церкви.

В Бишкеке, расположенном в 54 км от села Беловодское, погибших не было. Численность населения Бишкека (Пишпека) в 1880 году составляла 500 человек. В те годы в г.Башкеке и г.Верном постройки были не выше 2-3х этажей. Несмотря на низкую этажность и малую численность населения при Вернинском землетрясении погибло 330 человек и город был полностью разрушен.

История вопроса «Прогноз землетрясений»

Проблема прогноза мест сильных землетрясений в СССР стала актуальной после серии сильнейших землетрясений, произошедших в середине прошлого века (Ашхабадское 1948 г, Хаитское 1949). В это время в рамках Геофизического института АН СССР (сегодня ИФЗ РАН) были созданы геофизические полигоны в Гарме (200 км к северо-востоку от г. Душанбе), Талгаре (20 км от Алматы), сотрудники которых, идя своим путем, фактически с нуля закладывали основы сейсмологических исследований в СССР. Начавшиеся исследования в этой области возглавил Г.А. Гамбурцев, который в то время разрабатывал первые сейсмические методы изучения внутреннего строения коры [1,2]. Поэтому вполне объяснимо, что движение в направлении решения данной важнейшей проблемы он видел в изучении строения и физического состояния зон разломов. В заключении ученого совета Геофизического института АН СССР, прошедшем в декабре 1951 года, в разделе, связанном с изучением условий возникновения землетрясений и развития методов прогноза, после пяти пунктов организационного характера первым научным пунктом исследования было «изучение механизма тектонических деформаций методами полевых тектонофизических наблюдений и лабораторного моделирования». Эти исследования, по убеждению Г.А. Гамбурцева, должны были проводиться вместе с изучением глубинного строения и состояния разломов геофизическими методами (ГСЗ и КМИЗ), с развитием сейсмологических методов изучения динамических параметров очагов, с изучением региональной сейсмичности инструментальными, сеймотектоническими и тектонофизическими методами. Оперу на методы геотектоники и геофизики можно считать детерминированным подходом в прогнозе землетрясений. Конечной его целью было нахождение места подготовки будущих сильных землетрясений.

Вторым направлением исследований в области прогноза, которое отдельным пунктом вошло в постановление ученого совета ГЕОФИАН, было «изыскание предвестников землетрясений». Здесь основные исследования были связаны с выявлением закономерностей

вариации электрических, магнитных, деформационных (наклономеры) и других полей на стадии непосредственно перед землетрясением. Считалось, что комплексное использование данных геотектоники и геофизики позволит указать место будущего сильного землетрясения, а предвестники позволят разработать технологию предупреждения приближающейся опасности – прогноз времени землетрясения. При этом и здесь Г.А. Гамбурцев считал, что «необходимо находить такие физические характеристики явлений, которые могли бы нас избавить от необходимости прибегать к методу статистики». К сожалению, после смерти Г.А. Гамбурцева первое и главное с его точки зрения направление постепенно отошло на второй план. Лабораторное моделирование хрупкого разрушения стало играть вторичную роль (обоснование обобщенной модели очага), а полевые тектонофизические наблюдения надолго застыли на получении данных только об ориентации осей главных напряжений. Сейсмологи и геофизики в основном сосредоточились на статистических методах прогноза и методе поиска предвестников.

Существуют два главных подхода в выявлении опасности возникновения сильных землетрясений:

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

Здесь 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 сеймотектоническими 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.

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. Сейсмология в шутку говорят, что карты краснеют за своих создателей.

На самом деле 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, позволяющая понять, к какой эпохе, повышенной или пониженной сейсмической опасности относится сегодняшний период. В то же время имеются свидетельства существенной флуктуации сейсмического процесса во времени [3].

Следует заметить, что на этом же принципе актуализма (прямая связь между прошлым и будущим) построена и система прогноза мест катастрофически сильных землетрясений для северного фланга Тихоокеанской субдукционной области, разработанная академиком С.А. Федотовым [4-7]. В рамках этого подхода выделяются области сейсмических брешей первого рода, где землетрясения с магнитудой более 7.7 не наблюдались длительное время. С 70-х годов прошлого века действует прогноз сильного землетрясения вблизи Авачинской бухты (Камчатка). 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, Среднекурильские в

2007 и 2008 гг, Тохоку в 2011 г), а прогноз Авачинского землетрясения так и не был реализован.

Важно отметить, что карты сотрясаемости поверхности говорят о возможных последствиях от землетрясений, зоны возможного положения которых в общем то считаются определенными. Но этот подход не может нам сказать, когда произойдет землетрясение, даже с позиции среднесрочного прогноза

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

Сегодня прогноз землетрясений разделяется на три типа: долгосрочный, определяющий место и силу землетрясения; среднесрочный, уточняющий место и силу и определяющий приблизительное время землетрясения; краткосрочный, определяющий время события – часы, дни. Долгосрочный прогноз землетрясения, опирающийся на сейсмологические, сейсмотектонические и геологические данные, фактически не подразумевает указания точной даты землетрясения (годы – десятки лет до землетрясения) [7]. Среднесрочный прогноз делается за несколько месяцев до землетрясения. Такой прогноз землетрясений, как правило, базируется на анализе сейсмического режима региона [8]. Краткосрочный прогноз, который делается за недели – дни до землетрясения, также может использовать анализ сейсмичности. Считается, что наибольшие успехи в таком прогнозе землетрясений обеспечиваются данными о характере изменения во времени различных предвестников землетрясений [9].

Этот 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 [10-12].

Важно отметить, что карты сейсмического районирования [13,14] 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.

Сейчас можно констатировать, что в российских региональных сейсмических центрах существует устойчивое мнение о возможности среднесрочного прогноза по данным региональных сетей сейсмических станций для достаточно регулярно происходящих землетрясений магнитудного диапазона 4.5-5.5 [15 – 19]. При этом часто оказывается, что реально произошедшие события находятся на краю прогнозной зоны или даже выходят за ее пределы. Также отмечаются факты, когда наиболее сильные землетрясения оказываются неожиданными (Култукское землетрясение 2008 г, $M = 6.3$).

Однако накопившийся опыт неудачных среднесрочных прогнозов сильных региональных землетрясений, происходящих раз в 20-50 лет [20-24], показывает, что эта задача далека от решения. В частности, долговременный тест алгоритма прогноза $M7.5+$, $M8.0+$, MSc [8,10, 24] показывает, что пропуск цели составляет более 50%, а тревога составляет более 25% в параметрическом пространстве площадь – время [11].

Не все в порядке и с долгосрочным прогнозом, хотя он выглядит более достижимым [6]. Так, согласно алгоритму сейсмических брешей первого рода С.А. Федотова до сих пор не произошло прогнозируемое землетрясение с $M > 7.5$ вблизи Петропавловска на Камчатке. И

дело не в том, что оно долго не происходит, а в том, что мы не знаем, почему оно не происходит, и на какой стадии подготовки очага этого землетрясения находится процесс.

На мой взгляд, сбой в прогнозировании сильных землетрясений в большой части определяется проблемой взаимосвязи малой зоны, где зарождается землетрясение, и состояния основной области его очага, из которой выделяется 95% сейсмической энергии. В этой связи представляется целесообразным продолжить ту линию развития прогноза очага землетрясения, которая была намечена Г.А. Гамбурцевым и связана с изучением деформаций и напряжений в очаге готовящегося землетрясения. Это может позволить в конечном итоге понять, на какой стадии развития очага землетрясения находится опасная зона земной коры. Вместе с полученными в работах Г.Г. Кочаряна и его коллег [25, 26] новый импульс лабораторными экспериментами данные о напряжениях в очагах землетрясений позволят создать теорию детерминированного прогноза землетрясения.

Тектонофизический подход к прогнозу землетрясений

Предлагается обоснование необходимых факторов прогноза сильных землетрясений в исследуемом регионе начать с выделения сейсмогенного разлома земной коры соответствующей протяженности. Это связано с тем, что, как показали тектонофизические исследования напряженного состояния в сейсмоактивных районах, уровень девиаторных напряжений (максимальных касательных) здесь достаточно низок [27-29] и поэтому крупномасштабное хрупкое разрушение целых (вне разломов) участков коры невозможно. Для того, чтобы оно произошло, природа долгие годы изменяет локальную структуру коры, понижая ее прочность. Это происходит не только за счет механических факторов – накопление дефектов (микро и макротрещины), но и за счет действия геологических процессов, приводящих к насыщению трещин флюидами (дегидратация пород). Т.е. сначала в коре возникает крупномасштабный структурный дефект – разлом, а потом на нем возникает сильное землетрясение, а не наоборот.

Далее необходимо наличие активного сейсмического режима на изучаемом разломе на

неотектоническом этапе с желательным подтверждением возникновения сильных землетрясений на этом участке разлома или в непосредственной близости (на дистанциях масштаба очага сильного землетрясения). Это условие говорит о том, что для данного участка коры вещественное состояние пород (возможность периодического выделения флюида за счет реакции дегидратации пород) и структурно-морфологические особенности разломной системы (уровень волнистости разлома по простиранию и погружению, шероховатость, определяющие силы трения [30 - 32]) позволяют осуществлять сброс энергии, накопленной в упругих деформациях, за счет крупномасштабного хрупкого разрушения.

Требование возникновения в прошлом на исследуемом разломе сильных землетрясений связано с тем, что в последние несколько десятилетий [33-35] была показана альтернатива крупномасштабному хрупкому разрушению в виде низкочастотных, очень низкочастотных, тихих и др. землетрясений, эпизоды медленного скольжения, крипа, тремора и др., не вызывающих сильной сотрясаемости и больших ускорений движения поверхности.

Таким образом, оба первых главных фактора связаны с дефектом прочности земной коры. С другой стороны, ясно, что возможность возникновения крупномасштабного хрупкого разрушения связана также с достижением напряжениями, действующими на разломе, локальных значений прочности разлома.

Геомеханика хрупкого разрушения. В геомеханике [36-38] критическое состояние хрупкого разрушения определяется величиной кулоновых напряжений (τ_c), под которыми понимается разница между касательными напряжениями (τ_n), действующими на разрыве, и напряжениями сил трения, вызываемыми нормальными к разрыву напряжениями (σ_{nn}), при учете разупрочняющей роли флюидного

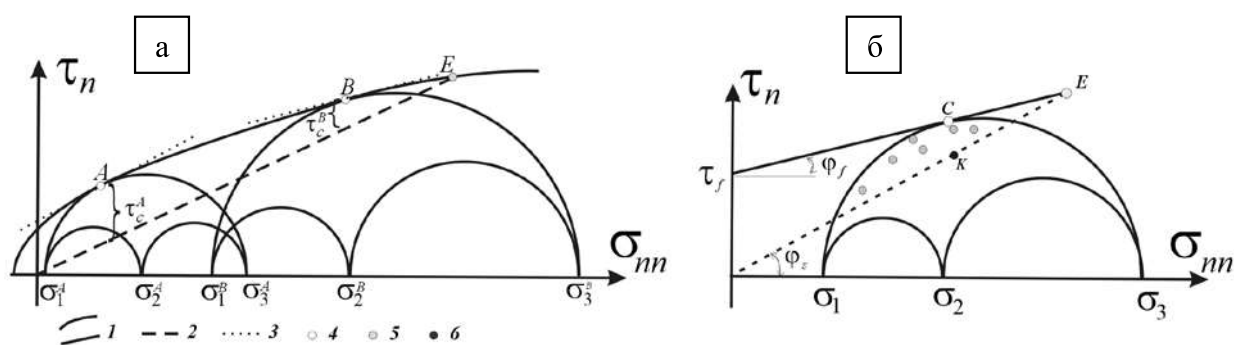
давления в трещинах и порах (p_{fl}). Рост уровня кулоновых напряжений до положительных значений характеризует приближение напряженного состояния к критическому, определяющему возможность хрупкого разрушения пород:

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

где $k_f = tg\varphi$ – коэффициент внутреннего трения (φ – угол внутреннего трения), τ_f – прочность внутреннего сцепления, а σ_{nn}^* – эффективное нормальное сжимающее напряжение, уменьшенное на величину флюидного давления (p_{fl}). 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 τ_f от напряжений (рисунок 2а). В тектонофизике [39] в связи с большими масштабами усреднения напряжений и невозможностью получения реальных данных о прочности больших массивов трещиноватых пород зависимостью параметров прочности от напряжений пренебрегают, полагая k_f и τ_f постоянными, считая, что коэффициент внутреннего трения равен коэффициенту статического трения на разрывах ($k_f = k_s$), как это имеет место для участка вблизи точки А на рисунке 2а.

Важно отметить, что при оценке кулоновых напряжений необходимо учитывать разницу между положением предельных линий (прочности и трения) на диаграмме Мора (рис. 2б), т.е. то, что $k_f < k_s$. Это обеспечивает большую эффективность хрупкого разрушения при среднем и даже невысоком уровне напряжений, отмеченном ранее в работе [40].



1 – предел хрупкой прочности (криволинейная или прямая линии); 2 – минимальное сопротивление “сухого” статического трения (стационарная стадия на разломе); 3 – касательные к предельной огибающей; 4 – предельное состояние на разломе, отвечающее максимальной прочности; 5 – напряженные состояния на участках разрыва меньше предельного (точка С для (б)); 6 – напряженное состояние минимального сопротивления хрупкого разрушения (точка К для (б)). τ_c^i – кулоновы напряжения для состояний А и С. А, В, С – предельные состояния хрупкого разрушения, Е – состояние разделяющее область хрупкого (слева) и псевдопластического (справа) деформирования породы. Звездочки над нормальными напряжениями, обозначающие учет влияния флюида, здесь не ставились.

Рисунок 2 – Г рафическая схема предельных состояний на диаграмме Мора для напряженных состояний, большие круги Мора которых, касаются предельной линии прочности: а) в виде криволинейно огибающей; б) упрощенное представление в виде прямолинейно предельной линии, не параллельной линии минимального сухого трения ($\tan \varphi_f = k_f, \tan \varphi_s = k_s$), используемое в тектонофизических методах при реконструкции напряжений.

Районирование по приращениям кулоновых напряжений. После работы [41-44] 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, а приращения кулоновых напряжений рассчитывались в окрестности эпицентра землетрясения для плоскостей, параллельных очагу. Первоначально аналитические или численные расчеты выполнялись для территорий, где имел место геодинамический режим напряженного состояния горизонтального сдвига – район разлома Сан-Андреас (США) [45], позднее подобный подход был распространен и на участки коры с другими режимами (горизонтальное сжатие или растяжение) [46].

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

Здесь $\Delta\tau_n$ и $\Delta\sigma_{nn}$ – приращения касательных и нормальных на разрыве напряжений, а Δp_{fl} –

приращение флюидного давления. Положительное значение $\Delta\tau_n$ и Δp_{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.

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

Предложенный в работе [41] подход первоначально применялся для обоснования проявления повышенной плотности афтершоков именно в участках коры, для которых были получены положительные значения приращений кулоновых напряжений. В дальнейшем этот же подход стал использоваться и для обоснования миграции сильных землетрясений вдоль разломных зон [47]. При этом для прогноза значений кулоновых напряжений на разломах используют результаты численного

геомеханического моделирования, которые получают, создавая механическую модель свойств участка земной коры и модель условий нагружения на основе, например, данных GPS-геодезии [47].

Следует заметить, что использование при расчете кулоновых напряжений данных о напряжениях, получаемых из численного моделирования, при директивном задании упругих свойств среды и прочностных свойств на разломе, конечно же, снижает достоверность конечного результата. Но самая главная проблема такого расчета - это полное отсутствие данных о величинах флюидного давления в разломе, которое на 70-90% определяет его прочность [29, 48-49].

Тектонофизические данные о напряжениях в природном массиве. Особенность тектонофизического подхода в изучении напряженного состояния земных недр состоит в том, что данные о напряжениях получают решением обратной задачи на основании интерпретации совокупностей разрывных деформаций (трещины со смещениями). Эти данные получают от сейсмологов, используя механизмы очагов землетрясений (сейсмологические индикаторы деформаций) и из собственных полевых работ – сбор зеркал скольжения (геологические индикаторы деформаций). В тектонофизике созданы методы решения обратной задачи – отыскании параметров тензора напряжений, отвечающих за анализируемую совокупность сейсмологических или геологических индикаторов разрывных деформаций [48-50]. Первоначально результатом решения такой обратной задачи (инверсии напряжений из разрывов) были данные только об ориентации осей главных напряжений [51-57], но позднее появились методы, позволяющие оценить форму эллипсоида напряжений [58-62].

Таким образом, из шести компонент тензора напряжений определялись четыре, три из которых отвечали углам, дающим ориентацию трех главных осей тензора напряжений, и еще один в виде коэффициента Лоде-Надаи или Райтио характеризовал соотношение девиаторных компонент этих напряжений. При этом два очень важных параметра тензора напряжений в виде среднего напряжения (изотропного давления) и максимальное касательное

напряжение оставались неизвестными. Эта проблема была решена в работах [63, 64] путем привлечения дополнительной информации из результатов сотен экспериментов [65-68] по хрупкому разрушению различного типа образцов горных пород (целые образцы, образцы с предразрушением, образцы с разрезами). Эти эксперименты показали, что все типы образцов, доведенные до разрушения, на диаграмме Мора попадают в полосу (сектор) хрупкого трещинообразования (рисунок 2), заключенную между линией минимального сопротивления сухого трения и огибающей линии прочности. Это позволило разработать алгоритм оценки величин изотропного эффективного давления (давление в твердом каркасе пород минус флюидное давление в трещинах и порах) и максимального касательного напряжения, нормированных на прочность сцепления (τ_f).

Отмечу, что в работе [70] также был предложен алгоритм расчета величин напряжений. Эти исследователи не смогли разработать алгоритм расчета нормированных напряжений, т.к. их алгоритм базировался на геологических данных о разрывах со смещениями и требовал знания их локальной прочности и флюидного давления в породах.

Тектонофизическое районирование активных разломов. В работе [71] для северной части Центрального Тянь-Шаня впервые была показана возможность выполнять районирование опасных участков разломов на основе результатов тектонофизической реконструкции напряжений в природном объекте. Сама реконструкция выполнялась по данным сейсмологической сети Кнет Научной Станции РАН в г. Бишкеке. В этом регионе за период сейсмических наблюдений сети Кнет не было землетрясений с магнитудой более 4.5. Плотность сейсмических событий каталога механизмов очагов землетрясений и их магнитудный диапазон определяли масштаб усреднения напряжений 10-20 км. Таким образом, районирование разломов по уровню кулоновых напряжений позволяло дать прогноз землетрясений с минимальной магнитудой 6.0-6.5 при длине опасного участка разлома 10-30 км. Было установлено, что к опасным участкам можно отнести около 10% имевшихся

Отмечу, что источником данных для тектонофизической реконструкции напряжений

могут являться сейсмологические или геологические индикаторы разрывных деформаций [49]. 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.

Результаты тектонофизического районирования активных разломов в зонах катастрофических землетрясений континентальных орогенов

В настоящее время накоплен некоторый опыт исследований закономерности распределения кулоновых напряжений в очагах сильных землетрясений внутриконтинентальных орогенов. В рамках проекта РФФИ - 19-55-53025 ГФЕЦа в 2019-2020 гг выполнялись исследования напряженного состояния в коре Западного Сычуаня (рисунок 3) по данным региональных сейсмических сетей КНР.

В задачу исследований входило также тектонофизическое районирование опасных участков активных разломов провинция Юннань и Сычуань (рисунок 4) в том числе в районе катастрофического Веньчуаньского землетрясения 2008 г с $M_w = 8.0$.

Результаты исследования кулоновых напряжений в области подготовки Веньчуаньского землетрясения [29] показали, 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 Веньчуаньского 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 Веньчуаньского землетрясения, где существовали протяженные участки относительно медленных, низкочастотных сейсмических движений [71] и участки, где наблюдались наибольшие разрушения и выделившаяся сейсмическая энергия была существенно выше [72].

Другие исследования по тектонофизическому районированию активных разломов были выполнены для провинции Караманмараш (Турция), где произошли два катастрофических Паранджинское ($M=7.8$) и Эльбистанское ($M=7.0$) землетрясения 06.02.2023 г [73, 74]. Здесь также предварительно была выполнена реконструкция напряженного состояния коры (рисунок 5).

Для этого региона расчет напряженного состояния позволил выявить их изменения на двух временных интервалах 1990-2010 гг и 2010-2022 гг. Было установлено, что в последние 10-15 лет в юго-западном секторе Восточного Анатолийской системы разломов (ВАР) увеличилась площадь коры с режимом горизонтального растяжения. Это говорит о том, что в этой части региона уменьшился уровень сжатия на разломах, что соответственно уменьшает и их прочность (1).

Выполненные расчеты кулоновых напряжений на разломах показали, что очаг готовящегося землетрясения, так же как и для Веньчуаньского землетрясения, выглядит очень неоднородно (рисунок 6). При этом характер этой неоднородности менялся во времени.

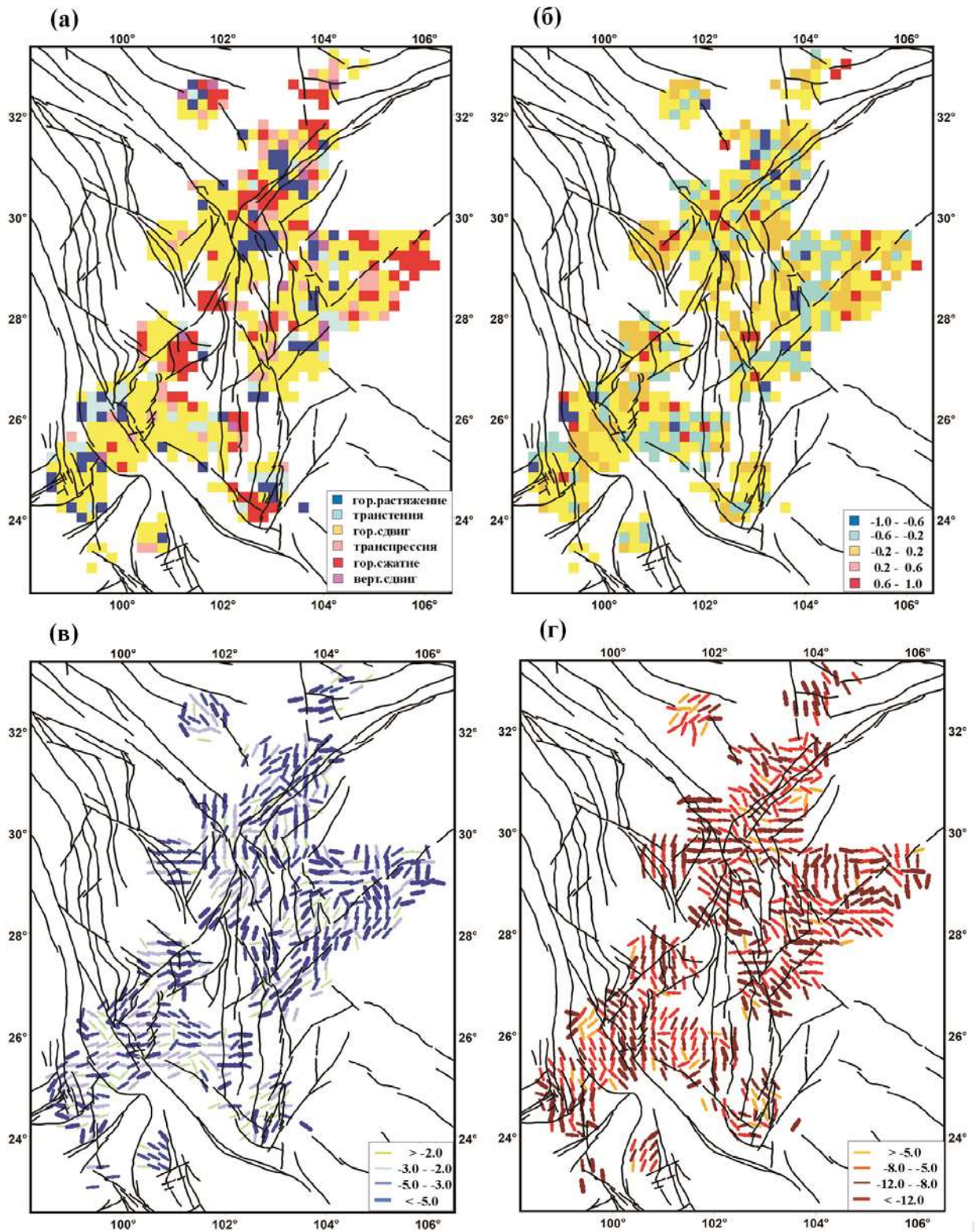


Рисунок 3 – Результаты реконструкции напряжений для коры Западного Сычуаня за весь период данных 1999-2010 гг: (а) геодинамический тип напряженного состояния; (б) коэффициент Лодэ-Надаи; (в) напряжения наибольшего и (г) наименьшего горизонтального сжатия и их нормированные на прочность сцепления τ_f значения (толщина линий и оттенки синего и красного цвета)

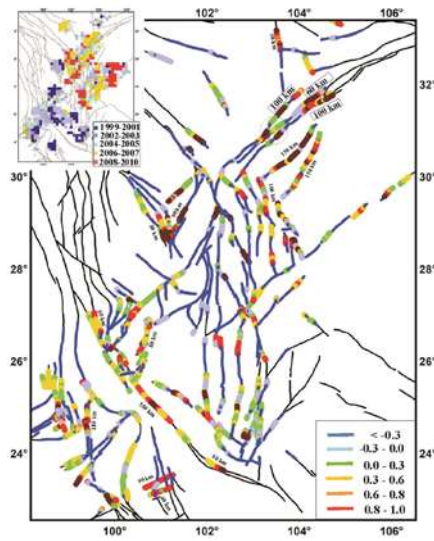


Рисунок 4 – Районирование разломов по уровню нормированных кулоновых напряжений (τ_{Cu} / τ_f). В верхнем левом углу показана карта точек расчета с данными по интервалам времени, им соответствующим.

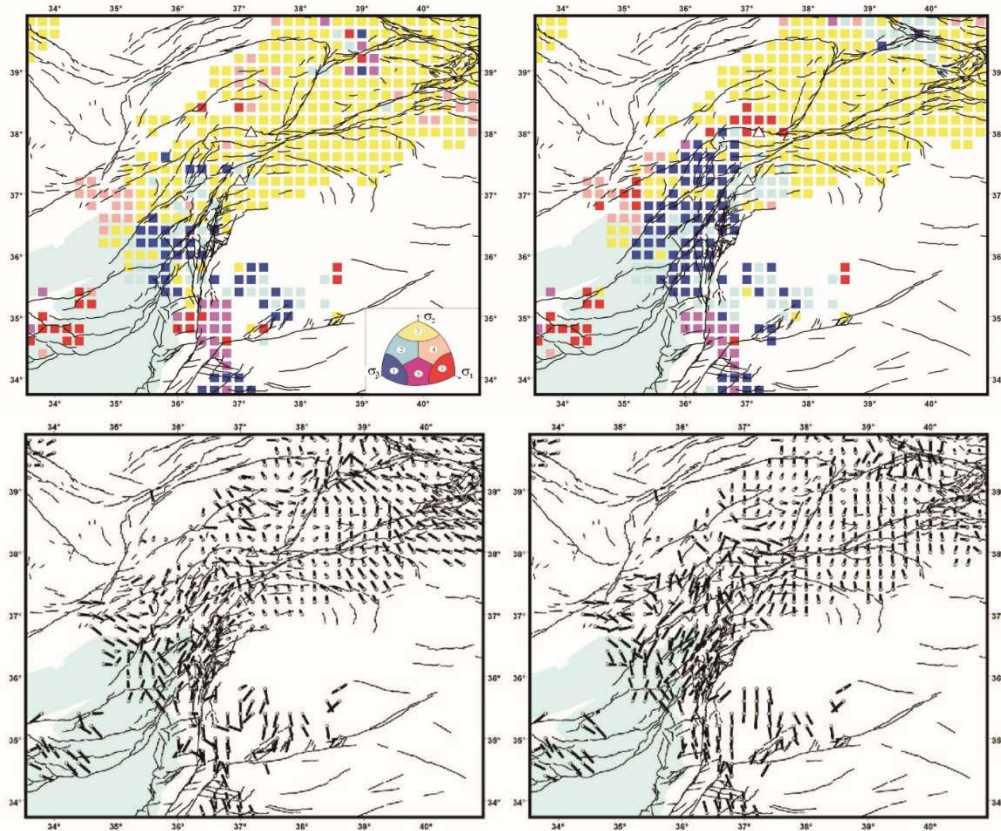


Рисунок 5 – Результаты реконструкции напряжений для коры Восточной Анатолии (Турция) для первого (а) 1990-2010 гг; б) последнего 2010-2022 гг – расчета по шкале времени: (I) геодинамический тип напряженного состояния. Расположение в октанте главных напряжений оси на Zenит определяет тип напряженного состояния: 1 – гор. растяжение, 2 – гор. растяжение со сдвигом или транстенсия, 3 – гор. сдвиг, 4 – гор. сжатие со сдвигом или транспрессия, 5 – гор. сжатие, 6 – вертикальный сдвиг; (II) ориентация осей наибольшего сжатия. Оси построены в узле расчета (кружочек) в направлении погружения. При угле погружения менее 7.5 градусов длина осей максимальная с кружком посередине

Согласно данным рисунок 6 участки достаточно высоких по уровню кулоновых напряжений в будущем очаге в период 1990-2010 гг занимали большие площади, чем в 2010-2022 гг. Непосредственно перед Паранджинским землетрясением (рисунок 6б), большая часть которого располагалась на главной ветви ВАР, две области экстремально высокого положительного уровня кулоновых напряжений были в юго-западной частях очага протяженностью около 40-60 км. Участки среднего и низкого уровня положительных значений кулоновых напряжений располагались в северо-восточной части будущего очага.

В средней части очага уровень кулоновых напряжений был либо положительный, но низкий, либо вообще отрицательный (т.е. здесь силы трения превышали уровень касательных напряжений). При этом эпицентр (начало старта) землетрясения располагался на опережающем разломе Нарли протяженностью около 60 км, косо подходящему к главному ВАР в средней части будущего очага Пазарджикского землетрясения. Вдоль большей его части разлома Нарли кулоновы напряжения были положительными и достаточно высокими. Мы полагаем, что сейсмическое движение, начавшееся по разлому Нарли и продолжавшееся около 15 секунд, привело к изменению напряженного состояния в средней части очага Пазарджикского землетрясения, создав здесь повышенный положительный уровень кулоновых напряжений.

Этот результат подтверждают исследования по прогнозу землетрясения для данного региона, выполненные в работе [75]. На основании алгоритма RTL [17] было показано, что разлом Нарли являлся опасным в среднесрочном прогнозе и мог инициировать землетрясение с магнитудой 6.5. Однако начавшись на разломе Нарли, сейсмогенный очаг перескочил на основную ветвь ВАР и создал землетрясения с магнитудой 7.8.

Таким образом, если рассматривать каждый из трех сегментов очага Пазарджикского землетрясения отдельно (юго-западный и северо-восточный участки ВАР, а также опережающий разлом Нарли), 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, которое объединило

в очаге эти участки, а также существовавшие между ними участки отрицательных значений кулоновых напряжений.

Согласно нашему расчету (рисунок 6б) для очага Эльбистанского землетрясения, произошедшего через 9 часов после Пазарджикского землетрясения, уровень кулоновых напряжений на разломе был всюду отрицательный. Изменения напряженного состояния, возникшие сразу после Пазарджикского землетрясения, имевшего лево-сдвиговые смещения, привели к уменьшению уровня сжатия на разломе. В результате кулоновы напряжения сменили знак и стали положительными (касательные напряжения превысили напряжения сил трения). Задержка по времени Эльбистанского землетрясения, вероятно, связана с тем, что в этот период в зоне разлома накапливались дополнительные упругие деформации за счет афтершоков первого землетрясения и медленных асейсмических движениях, которые способствовали росту кулоновых напряжений на Эльбистанском разломе.

Полученные результаты исследований показывают, 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 Пазарджикского землетрясения, которое вместо землетрясения на разломе Нарли с магнитудой не более 6.5 – 7.0 (для первого сегмента очага), стало землетрясением 7.8, так и для второго Эльбистанского землетрясения, которое вообще не должно было произойти.

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.

Приведенные здесь результаты тектонофизического районирования очагов произошедших сильных землетрясений являются новыми и уникальными.

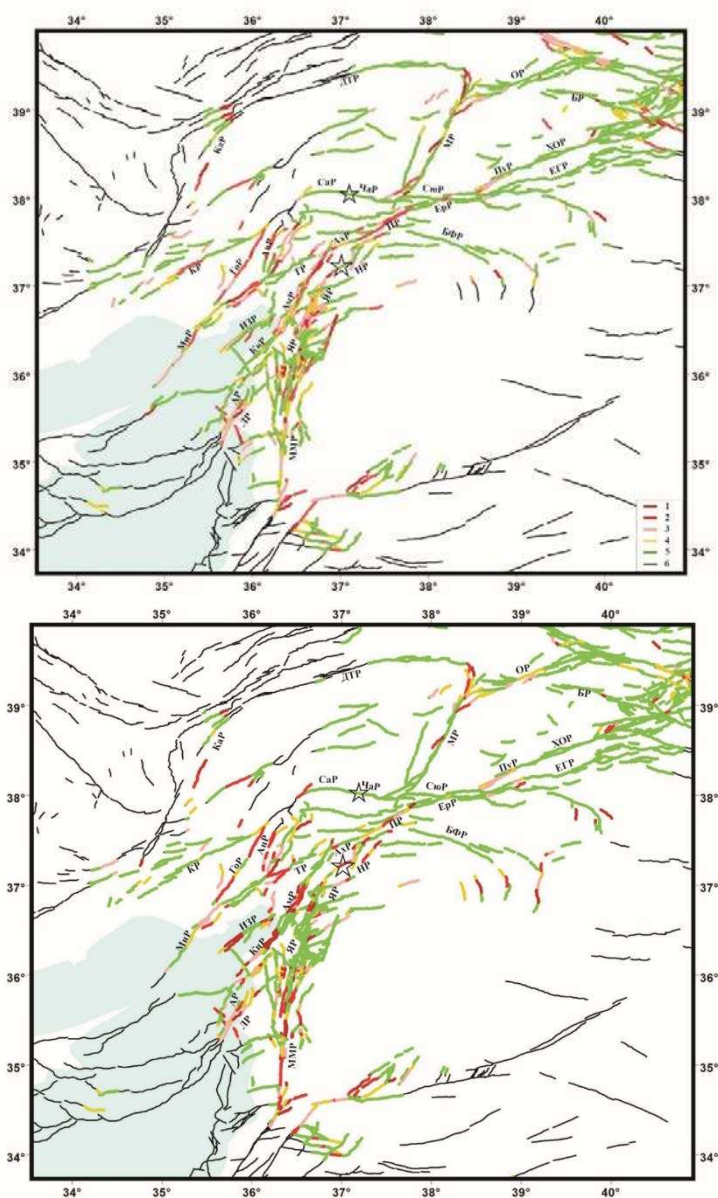


Рисунок 6 – Районирование для двух стадий расчета напряженного состояния:
 а) начальная (1990-2010 гг), б) конечная (2010-2022 гг)– участков активных разломов из базы данных [Бачманов и др., 2017] по уровню кулоновых напряжений: 1) $0.8 < \frac{\tau_c}{\tau_f} \leq 1$ (темно красный);
 2) $0.5 < \frac{\tau_c}{\tau_f} \leq 0.8$ (красный); 3) $0.2 < \frac{\tau_c}{\tau_f} \leq 0.5$ (розовый); 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

В заключении отмечу, что в самое последнее время тектонофизические методы реконструкции напряжений дополнились возможностью определения таких параметров тектонических процессов, как мощность энтропии и мощность рассеяния энергии упругих деформаций (мощность диссипации). В МКА разработаны алгоритмы расчета этих параметров применительно

к каждому акту хрупкого разрушения (как для сейсмологических, так и для геологических индикаторов разрывных деформаций), а также к объему геосреды, для которой выполнен расчет параметров напряженного состояния. Получение этих данных может оказаться очень перспективным для установления приближения процесса деформирования к критической стадии

Обсуждение

Результаты тектонофизических исследований активных разломов, приведенные выше, с одной стороны, подтвердили возможность их районирования с выделением опасных участков. С другой стороны, они показали, что распределение кулоновых напряжений в очагах будущих сильных землетрясений далеко от тех представлений, которые существовали в прогнозной сейсмологии.

Так, для всех имеющихся на сегодняшний день моделей подготовки очага землетрясений: лавинно неустойчивого трещинообразования (ЛНТ-модель) [76], дилатансионно-диффузионная модель (ДД-модель) [77], модель неустойчивого скольжения (stick-slip) [78] и модель консолидации [79] – считается, что землетрясению предшествует появление препятствия смещению вдоль разлома, которое определяет постепенное повышение действующих здесь касательных напряжений до предельных значений. В области, окружающей будущий очаг, сброс внутренней механической энергии резко замедляется, происходит накопление энергии упругих деформаций [80]. «Наиболее высокие напряжения концентрируются в местах пересечения или излома геологических разломов. ... Существует ряд участков земной коры, находящихся в состоянии, близком к пределу длительной прочности» [81]. Если прочность спайки – разлома достаточно высока, то повышенный уровень касательных напряжений [82, 83] охватывает все большие области в его окрестности. После достижения напряжениями предела прочности горных пород [84] или предельного значения плотности потенциальной энергии [85] объем, накопивший высокий уровень упругой энергии (высокий уровень напряжений), разрушается с образованием сдвигового разрыва, представляющего собой очаг землетрясения [86]).

Как показали тектонофизические исследования напряженного состояния сейсмогенных разломов, достижение критического состояния на разломах определяется не только и не столько уровнем касательных напряжений, но также их соотношением с уровнем напряжений сил трения, т.е. от нормальных к разрыву напряжений (рисунок 2). Особенность прочностных характеристик при хрупком разрушении (предел прочности и минимальная

прочность трения) показывают, что наибольшая величина кулоновых напряжений и соответственно выделяющаяся при землетрясении в сейсмических волнах упругая энергия достигается при среднем уровне напряжений (см. работу [40]).

Было установлено, что распределение напряжений в сейсмогенном регионе может изменяться за времена первые десятки лет, что приводит к изменению распределения кулоновых напряжений на разломах. Кроме того, оказалось, что большие участки будущего очага могут находиться далеко от предела хрупкой прочности, определяемого уровнем кулоновых напряжений, но в ходе развития землетрясения за счет изменения напряженного состояния в них также может быть достигнут предел прочности. Таким образом, на сейсмогенных разломах возможны, как медленные, так и быстрые изменения распределения напряжений. Поэтому для учета первого фактора (медленные изменения напряжений) необходимо наладить тектонофизический мониторинг напряженного состояния на основе регулярно пополняемых каталогов механизмов очагов землетрясений. Для учета второго фактора (быстрые изменения напряжений в ходе возникновения землетрясения) данных о напряженном состоянии на разломах сегодняшнего дня для статической стадии деформирования недостаточно для прогноза. Необходим также геомеханический расчет возможных вариантов развития сейсмического процесса в случае разных положений гипоцентра (стартовой точки) землетрясения.

Задача прогноза сильных землетрясений Тянь-Шаня

В США с начала 80-х годов прошлого столетия осуществлялся эксперимент по развитию методов прогноза на великолепно оснащенном различной сейсмологической, геофизической и геодезической аппаратурой Паркфилдском полигоне, где с регулярностью 20-25 лет происходили землетрясения с магнитудами, близкими к $M = 6$. Таким образом, заранее было известно место будущего землетрясения, его магнитуда и приблизительно время. Был создан международный полигон, на котором ученые из разных стран изучали процесс подготовки землетрясения.

Предполагалось, что выполняемые наблюдения позволят выявить особенности деформационного режима и сопутствующих ему физических полей в различные периоды формирования очаговой области.

Первоначально землетрясение в Паркфилде ожидали в 1988 ± 7 (Lindh, Sykes, Bakun, и др.), затем в $1993-1995 \pm 11$ (Eflsworth, Ben-Zion). После 1999 г. представление прогноза по этому региону в научной литературе практически прекратилось. Землетрясение произошло 28 сентября 2004 г., когда его менее всего ожидали, и оно не сопровождалось предваряющим крипом и форшоками [88] так, как это было при предыдущих землетрясениях в этом районе. Предварительный анализ данных геофизических полей, полученных перед его возникновением, также не позволил выявить каких-либо значимых аномалий, которые можно было бы трактовать как предвестник землетрясения [89]. В то же время за период ожидания этого землетрясения в Калифорнии произошла серия сильных землетрясений с магнитудами большими, чем землетрясение в Паркфилде: Лома Приета 18.10.1989 ($M = 6.9$), Капе Мендосино 24.04.1992 ($M = 7.2$), Ландерс ($M = 7.1$) 28.06.1992, Нордридж 17.01.1994 ($M = 6.7$), Гектор Майн 16.10.1999 ($M = 7.1$), Сан Симеон 22.12.2003 ($M = 6.5$). Землетрясения были неожиданными, они нанесли не только серьезный материальный урон экономике США, но и показали, что в исследованиях по предупреждению сейсмической опасности нет значимого продвижения.

В настоящее время Тянь-Шань предоставляет уникальную возможность на новом этапе научных знаний о проблеме землетрясений создать комплексную систему прогноза сильных землетрясений. Для этого есть все основания. Это район, где постоянно происходят землетрясения с магнитудами до 5.5. Так на алматинском сейсмическом полигоне с 1969 года произошло более 10 000 событие с энергетическим классом более 7 (магнитуда около 2.5).

С другой стороны, как было представлено во введении, Ушинское землетрясение $M=7.1$, произошедшее 23 января 2024г в южных предгорьях китайского Тянь-Шаня, может означать начало серии сильных сейсмических событий, которые имели место в этом регионе с 1885 по 1985 гг в виде 15 землетрясений с $M \geq 6.9$. В среднем повторяемость землетрясений

такой силы за этот столетний период составила около 7 лет. Но в реальности минимальное время между двумя сильными землетрясениями доходило до 2-х лет (Боловодское 1885 г., Вернинское 1887 г., Челикское 1889 г.) и был случай двух сильных землетрясений в одном 1911 году (Кеминское и Сарезское). В работе [89] отмечается, что с 1885 по 1911 гг произошло 8 сильных землетрясений, четыре из которых были в северных и еще четыре в южных предгорьях Тянь-Шаня. Авторы рассматривают этот период в 26 лет как взрывную активизацию сильных землетрясений на Тянь-Шане, отмечая взаимосвязь землетрясений южного и северного предгорий. Поскольку последняя активизация сильных землетрясений началась с Беловодского (1885 г.) с $M=6.9$, близкой к Ушинскому землетрясению, можно предположить, что у нас есть минимум 1-2 года до следующего сильного землетрясения, аналогичного Вернинскому (1887 г.) с $M=7.3$.

Т.е. в этом регионе с активным сейсмическим режимом есть высокая вероятность возникновения сильных землетрясений с магнитудами более 7.0. В странах СНГ, расположенных на территории Тянь-Шаня за последние 30-35 лет увеличилась численность населения и, что самое важное, резко возросли темпы строительства домов высокой этажности. Таким образом, характер гражданской и промышленной инфраструктуры не сопоставим с той, что была здесь в конце 19 и начале 20 веков, когда происходили сильные землетрясения с $M > 7.0$. Встает вопрос, есть ли возможность, научный базис для создания систему предупреждения сейсмической опасности в режимах долгосрочного и среднесрочного прогноза.

На этот вопрос можно дать утвердительный ответ. В Узбекистане, Казахстане, Кыргызстане уже давно развернуты и хорошо работают региональные сейсмические сети. Имеются сильные научные группы по прогнозу землетрясений, базирующиеся на сейсмических данных и на данных геофизических полигонов. Так, в Узбекистане имеется региональная сеть из порядка 50 современных цифровых сейсмических станций (рисунок 7). С конца 70-х годов прошлого века для территории Узбекистана на регулярной основе определяются механизмы очагов землетрясения с магнитудой более 3.0. В Институте

сейсмологии им. Г.А. Мавлянова плодотворно работает сейсмологическая группа Т.У. Артикова (Р.С. Ибрагимов, Т.Л. Ибрагимова и

др.), которая регулярно дает оценку – прогноз сейсмической опасности в долгосрочном и среднесрочном режимах.

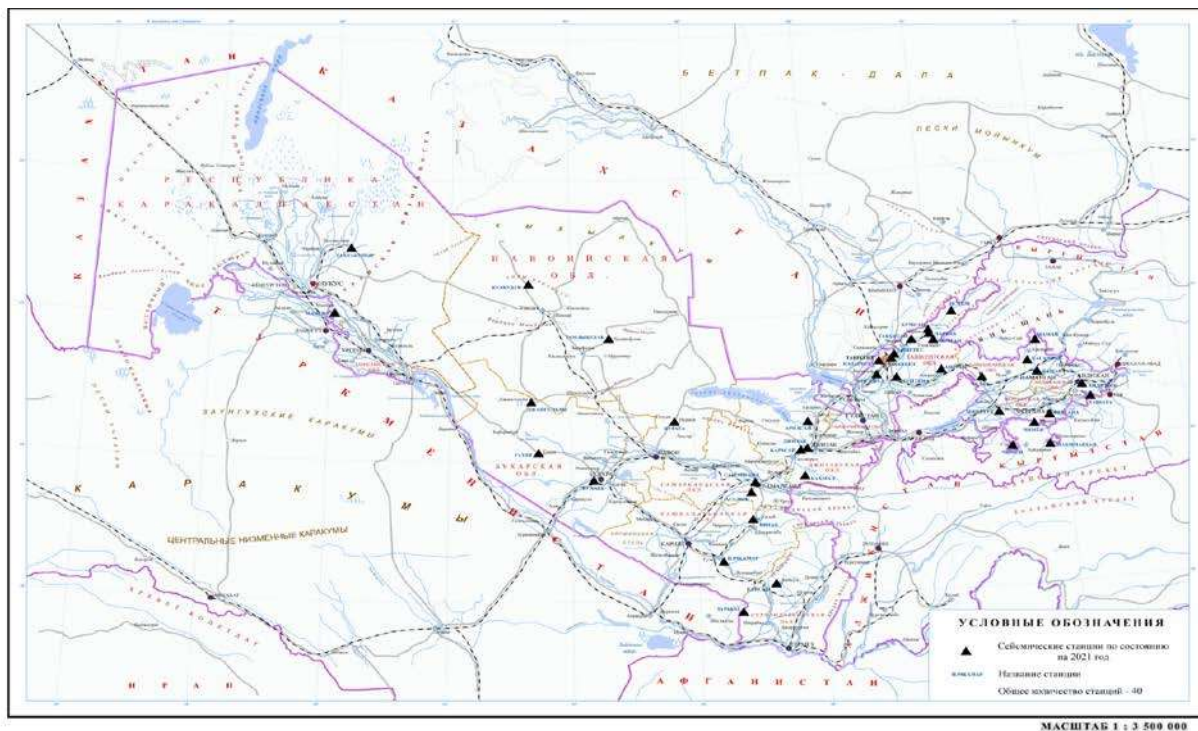


Рисунок 7 – Расположение сети сейсмических станций в Узбекской Республике (карта предоставлена Ибрагимовым Р.С – Институт сейсмологии, г. Ташкент, УР).

В Казахстане существует региональная сеть сейсмических станций СОМЭ МОН РК (рисунок 8) в пределах алматинского сейсмического полигона (северные предгорья Тянь-Шаня). С конца 60-х годов прошлого века для него определяются механизмы очагов землетрясений энергетическим классом 7 и более ($M > 2.4$). В Институте сейсмологии имеются лаборатории Комплексного прогноза землетрясений (рук. А.В.Виляев, гнс О.М.Белослюдцев, гнс А.Г.Фремд) и Региональной сейсмичности (рук. А.Т.Данабаева, гнс Г.Я. Хачикян и др.), которые занимаются исследованием сейсмического режима для территории Казахстана и прогнозом землетрясений.

В Кыргызстане имеется региональная сейсмическая сеть (ОМСЭ) и локальная сеть Кнет Научной станции РАН. В Институте сейсмологии НАН КР длительные годы формируется каталог механизмов очагов землетрясений, который начинается с

Чаткальского землетрясения 1946 года. Его создавали Т.А.Лопатина, Н.Х.Багманова, З.А. Кальметьева, А.М. Муралиев. С 1960 года каталог представлен по землетрясениям с $K \geq 11$, а с 1973 – с $K \geq 10$, с 1980 с $K \geq 9$. В настоящее время этими работами руководил А.М. Муралиев. На научной станции РАН с 1994 года на базе сейсмической сети Кнет создан каталог механизмов очагов землетрясений, насчитывающий более 1600 событий в диапазоне энергетического класса от 6 до 13.7.

С другой стороны, в ИФЗ РАН (Россия, г. Москва) накоплен большой опыт удачного и неудачного прогноза землетрясений на основе одних сейсмических данных или данных разного типа предвестников. Это позволяет более трезво понимать его ограниченность, а также необходимость комплексного решения этой проблемы. Как выше уже говорилось в ИФЗ РАН в лаборатории тектонофизики разработаны методы определения коровых напряжений из

сейсмологических и геологических индикаторов разрывных деформаций. Созданы алгоритмы расчета критических (кулоновых) напряжений

на разломах, что позволяет выделять опасные участки разломов качестве возможных зон генерации сильных землетрясений.

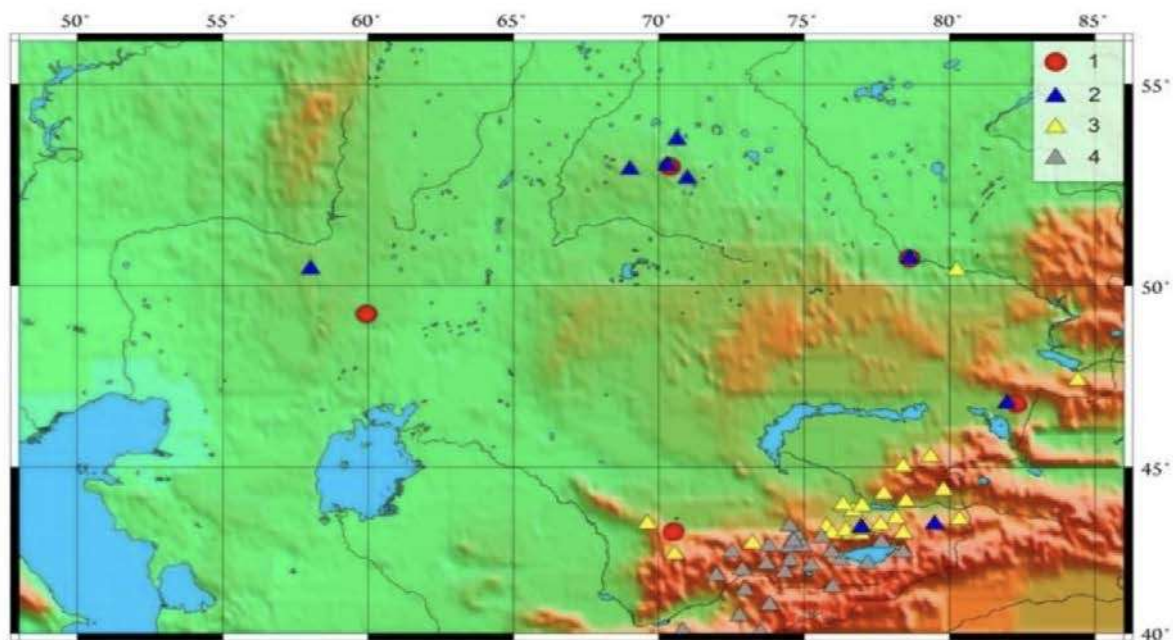


Рисунок 8 – Расположение сети сейсмических станций Республиках Казахстан и Кыргызстан (карта предоставлена Виляевым А.В. – Институт сейсмологии, г. Алмата, Республика Казахстан);
 1 – сейсмические группы; 2 – трехкомпонентные сейсмические станции ИГИ;
 3 – сейсмические станции СОМЭ МОН РК; 4 – сейсмические станции Knet (НС РАН в г. Бишкеке) и ОМСЭ Республики Кыргызстан

Со многими группами сейсмологов Узбекистана, Казахстана и Кыргызстана лаборатория тектонофизики ИФЗ РАН (Россия) ведет совместные исследования по изучению природного напряженного состояния по сейсмологическим индикаторам разрывных деформаций. Также наша лаборатория уже более 15 лет сотрудничает с Ключевой лабораторией Администрации по землетрясениям Геологического института в г. Пекине Китайской Народной Республики. Все это может рассматриваться как хороший базис для проведения совместных работ по изучению опасных участков разломов для территории всего Тянь-Шаня.

В рамках решения такой задачи обобщим сегодняшнее состояние тектонофизических исследований сейсмических опасностей:

1. Разработаны алгоритмы расчета не только ориентации главных осей и формы эллипсоида напряжений, но и нормированных на прочность сцепления величин шаровой и девиаторной компонент тензора напряжений для

геологических и сейсмологических индикаторов разрывных деформаций [48-50].

2. Созданы программы автоматизированного расчета напряжений по данным каталогов механизмов очагов землетрясений (STRESSsesim) и по данным о зеркалах скольжения (STRESSgeol).

3. Выполнены региональные реконструкции современного напряженного состояния для большей части сейсмоопасных регионов Мира [48] и осуществлена реконструкция глобального поля напряжений [90].

4. Разработаны алгоритмы и программы тектонофизического районирования опасных участков активных разломов по уровню кулоновых напряжений.

5. Созданы первые, предварительные, карты опасных участков разломов по данным о величинах кулоновых напряжений для севера Центрального Тянь-Шаня [91], Алтая, Байкала [92], Восточно-Анатолии [74], Западного Сычуаня (Китай) [29]

6. Разработаны алгоритмы расчета мощности диссипации механической энергии упругих деформаций и энтропии из данных о напряжениях и механизмов очагов землетрясений.

7. На сервере ИФЗ РАН создан интернет-ресурс «Тектонические напряжения Евразии», позволяющий проводить анализ данных о напряжениях и опасных разломах.

Предлагается совместный план работ по созданию системы долгосрочного прогноза землетрясений, в котором ядром будут являться тектонофизические методы расчета разработанные в ИФЗ РАН и накопленные за более чем за 50 лет каталоги землетрясений и каталоги механизмов очагов землетрясений, а также комплекс геологических, сейсмологических и геофизических методов исследования сейсмических опасностей. Этот план предусматривает следующие работы в части долгосрочного прогноза землетрясений:

1. Актуализация единого каталога землетрясений и каталога механизмов очагов землетрясений Тянь-Шаня.

2. Тектонофизическая реконструкция верхнекоровых напряжений (глубины 0-15 км) для всей территории Тянь-Шаня.

3. Тектонофизическое районирование опасных участков разломов по уровню кулоновых напряжений на основе данных с сайта «Активные разломы Северной Евразии» (ГИН РАН).

4. Проведение специальных геофизических и тектонофизических полевых работ для выделенных опасных участков разломов с целью уточнения их положения, геоморфологических и геомеханических данных.

5. Проведение сейсмотектонических исследований в ближней зоне выделенных опасных участков разломов с целью выявления палео и исторических землетрясений. Установление повторяемости сильных землетрясений этих участков и вблизи них.

6. Создание технологии мониторинга напряженного состояния и опасных участков разломов, выделяемых по результатам регулярно повторяемых в автоматическом режиме реконструкций напряженного состояния (1-2 раза в год).

7. Геомеханические расчеты изменения напряжений на опасных участках разломов и их

продолжениях в случае реализации сейсмогенного разрыва в зонах с наибольшим уровнем кулоновых напряжений,

8. Размещение всех получаемых результатов на интернет-ресурсе «Тектонические напряжения Евразии» и др. интернет-ресурсах ИФЗ РАН.

Результаты исследований в рамках долгосрочного прогноза сильных землетрясений Тянь-Шаня, позволят не только выявить наиболее опасные участки разломов, но и оценить магнитудный уровень ожидаемого сейсмического события.

В рамках среднесрочного прогноза сильных землетрясений предполагается выполнить следующие исследования:

1. Прогноз места и силы землетрясения на основе сейсмологических методов: RTL [17, 93], сейсмических шумов [94], M7.5 и MSc [10] и др.

2. Регулярный мониторинг состояния опасных участков разломов по данным спутниковой InSAR интерферометрии (по мере появления новых снимков опасных районов).

3. Обследование опасных участков разломов методами спутниковой геодезии с размещением временных пунктов ГНСС наблюдений

4. Периодические (1-2 раза в год) обследования опасных участков разломов методами сейсмотектоники с выявлением следов активизации движений на разломе.

5. Разработка методики оценки близости состояния коры и опасных участков разломов к предельному по данным анализа морфологии фазового пространства, получаемого из данных о мощности диссипации механической энергии и мощности энтропии. Выполнение районирования коры.

6. Исследование опасных участков разломов геофизическими методами (электромагнитные методы, методы анализа микросейсм).

7. Геомеханические расчеты изменения напряженного состояния и кулоновых напряжений на разломах при различных вариантах активизации различных участков разломов в зоне, выделенной в качестве опасной.

Представленные здесь пункты плана исследований обсуждались на Ученом Совете ИФЗ РАН (28.02.2024) и были поддержаны членами совета. По мере развития работ по долгосрочному и среднесрочному прогнозу

можно будет перейти к обсуждению методов краткосрочного прогноза.

В настоящее время представленные в статье предложения уже начинают выполняться за счет инициативных (без специального финансирования) совместных исследований между сотрудниками ИФЗ РАН и сотрудниками сейсмологических институтов Узбекистана и Казахстана. Обсуждается возможность объединения этих работ с исследованиями Института сейсмологии Кыргызстана. Очень важным для успешного развития работ будут результаты выполнения первых трех пунктов представленного выше плана исследований по долгосрочному прогнозу, которые должны быть протестированы полевыми тектонофизическими, сеймотектоническими и геофизическими работами (4 и 5 пункты).

Выводы

Рассмотрена проблема активизации сейсмического режима Тянь-Шаня и возможности возникновения в ближайшие несколько лет сильных землетрясений в его южных и северных предгорьях.

Дан краткий обзор современного состояния вопроса по прогнозу сильных землетрясений. Отмечено, определенное несоответствие базовых представлений существующих моделей очага землетрясений и имеющихся геомеханических данных о хрупком разрушении горных пород.

Представлены последние достижения тектонофизики в области изучения современного напряженного состояния непосредственно в массивах горных пород. Показана возможность по результатам тектонофизической реконструкции природных напряжений выполнить районирование активных разломов по уровню кулоновых напряжений, отвечающих за реализацию хрупкого разрушения. Дан анализ результатов районирования активных разломов,

выполненный в очагах сильного Веньчуаньского землетрясения ($M=8.0$, 2008 г) и Карамуширского землетрясения ($M=7.8$, 2023 г.).

Выполнен анализ возможностей осуществить долгосрочный и краткосрочный прогноза на основе комплекса сейсмических, сеймотектонических и геофизических методов, опирающихся на результаты тектонофизического районирования активных разломов.

Создан системный план долгосрочного и среднесрочного прогноза сильных землетрясений Тянь-Шаня на основе комплекса методов: тектонофизический метод районирования опасных участков разломов по данным о кулоновых напряжений; сейсмические методы статистического прогноза землетрясений для участков разломов, выделенных в качестве опасных; сеймотектонические методы и методы спутниковой геодезии (включая радарную интерферометрию на больших временных интервалах) по обнаружению признаков поверхностных проявлений стадии подготовки землетрясения в опасных участках разломов; геофизические методы нахождения предвестниковых признаков подготовки землетрясения по данным электромагнитных аномалий, аномалий давления воды в скважинах и изменений химического состава воды; геомеханические методы расчета напряжений для различной последовательности сейсмической активизации на участках разломов, выделенных как опасные.

Предлагается весь регион Тянь-Шаня рассматривать как полигон отработки технологии долгосрочного и среднесрочного прогноза. Имея в виду предыдущий этап активизации сильных землетрясений длительностью около 100 лет, предлагаемые работы по прогнозу опасных участков разломов должны выполняться в долговременном режиме, фактически осуществляя мониторинг состояния коры и активных разломов Тянь-Шаня.

Литература

- 1 Гамбурцев Г.А. Состояние и перспективы работ в области прогноза землетрясений // Избранные труды. М.: Изд-во АН СССР, 1960. С. 427–435.
- 2 Гамбурцев Г.А. Состояние и перспективы работ в области прогноза землетрясений // Бюллетень Совета по сейсмологии АН СССР. 1955. № 1. С. 7–14.
- 3 Гусев А.А., Шумилина Л.С. Повторяемость сильных землетрясений Камчатки в шкале моментных магнитуд // Физика Земли. 2004 № 2 С.1-9.
- 4 Федотов С.А. Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги. М.: Наука. 2005. 302 с.

- 5 Федотов С.А. О сейсмическом цикле, возможности количественного сейсмического районирования и долгосрочном сейсмическом прогнозе // Сейсмическое районирование СССР. М.: Наука. 1968. С. 121–150.
- 6 Федотов С.А. Сейсмологические исследования Тихоокеанской экспедиции Института физики Земли АН СССР в 1957–1963 гг. // Сейсмическое микрорайонирование. Тр. Ин-та физики Земли АН СССР. № 36 (203). М.: Наука, 1965 С. 61–65.
- 7 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.
- 8 Kossobokov V.G., Healy J.H., Dewey J.W. Testing an earthquake prediction algorithm // PAAG. 1997, V.149. P. 219–232
- 9 Cicerone R.D., Ebel J.E., Britton J., A systematic compilation of earthquake precursors // Tectonophysics. 2009. V. 476 (3). P. 371–396.
- 10 Кособоков В.Г. Теоретическая база и алгоритмы прогноза землетрясений на основе предвестниковой активизации сейсмичности // Автореферат диссертаций степени д. физ.-мат. н. М.: 2004. 36 с
- 11 Кособоков В.Г., Щепалина П.Д. Времена повышенной вероятности возникновения сильнейших землетрясений мира: 30 лет проверки гипотезы в реальном времени // Физика земли. 2020. № 1. С. 43–52
- 12 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
- 13 Уломов В.И. Сейсмогеодинамика и сейсмическое районирование Северной Евразии // Вулканология и сейсмология. 1999. № 4–5. С. 6–22.
- 14 Уломов В.И., Шумилина Л.С. Комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации – ОСР-97. Масштаб 1:8 000 000. Объяснительная записка и список городов и населенных пунктов, расположенных в сейсмоопасных районах. М.: ОИФЗ. 1999. 57 с
- 15 Ружич В.В. О среднесрочном прогнозе землетрясений в Прибайкалье // Геофизические исследования в Восточной Сибири на рубеже XXI века. – Новосибирск: Наука, СИФ, 1996. С. 143–147.
- 16 Соболев Г.А., Тюпкин Ю.С. Стадии подготовки, сейсмические предвестники и прогноз землетрясений Камчатки // Вулканология и сейсмология. 1998. № 4. С. 17–24
- 17 Завьялов А.Д. Среднесрочный прогноз землетрясений. Основы, методика, реализация. М.: Наука. 2005. 254 с.
- 18 Салтыков В.А., Кугаенко Ю.А., Сеницын В.И., Чебров В.Н. Предвестники сильных землетрясений на Камчатке по данным мониторинга сейсмических шумов // Вулканология и сейсмология. 2008. № 2. С. 110–124
- 19 Копылова Г.Н. Гидрогеодинамические предвестники сильных землетрясений камчатки: примеры и использование для сейсмического прогноза // Современные проблемы механики. 2018. № 33 (3). С. 6–15
- 20 Wyss M., Harbermann R.E. Precusory seismic quiescence // AGEOPH. 1988. V. 126. No 2.4. P. 319–332.
- 21 Сидорин А.А. Предвестники землетрясений. М.: Наука. 1992. 190 с.
- 22 Bakun W.H., Aagaard B., Dost B., Ellsworth W.L., Hardebeck J.L., Harris R.A., Ji C., Johnston M.J.S., Langbein J., Lienkaemper J.J., Michael A.J., Murray J.R., Nadeau R.M., Reasenberg P.A., Reichle M.S., Roeloffs E.A., Shakal A., Simpson R.W., Waldhauser F. Implications for prediction and hazard assessment from the 2004 Parkfield earthquake // Nature. 2005. V. 437, No 13. P. 969–974.
- 23 Panza, G., Kossobokov, V.G., Peresan, A., Nekrasova A., 2014. Why are the standard probabilistic methods of estimating seismic hazard and risks too often wrong. In: M. Wyss, J.F. Shroder (Eds.). Earthquake hazard, risk and disasters. Elsevier, Amsterdam, 309–357.
- 24 Keilis-Borok, V.I., Kossobokov V.G. Premonitory activation of seismic flow: algorithm M8 // Phys. Earth Planet. Inter. V. 61. P. 73–83.
- 25 Кочарян Г.Г., Батухтин И.В. Лабораторные исследования процесса скольжения по разлому как физическая основа нового подхода к краткосрочному прогнозу землетрясений // Геодинамика и тектонофизика. 2018. 9 (3). 671–691. Kocharyan, G.G., Batukhtin, V.I., 2018. Laboratory studies of the fault sliding process as a physical basis for a new approach to short-term earthquake prediction // Geodynamics and Tectonophysics. V.3; No.9. P. 671–691.
- 26 Кочарян Г.Г., Новиков В.А. Экспериментальное исследование различных режимов скольжения блоков по границе раздела. Часть 1. Лабораторные эксперименты // Физ. мезомех. 2015. Т. 18, № 4. С. 94–104.
- 27 Ребецкий Ю.Л. Закономерности разномасштабного разрывообразования в коре и тектонофизические признаки метастабильности разломов // Геодинамика и тектонофизика 2018. Т 9, Вып. 3. С. 629–652.
- 28 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>
- 29 Ребецкий Ю.Л., Полец А.Ю. Напряженное состояние в афтершоковой области землетрясения Тохоку 11.03.2011 // Вулканология и Сейсмология, 2021, № 4, С. 22–44.
- 30 Barton N., Choubey V. The shear strength of rock joints in theory and practice // Rock Mechanics. 1977. V. 10. P. 1–54.
- 31 Barton N., Lien R., Lunde J. Engineering classification of rockmasses for the design of tunnel support // Rock Mech 1974. V. 6, No. 4. P. 189–236.
- 32 Brady B., Bzown E. Rock mechanics for underground mining, Third ed. Kluwer Acad. Publ., 2004. 688 p
- 33 Peng Z., Gomberg J. An integrated perspective of the continuum between earthquakes and slow-slip phenomena // Nature Geoscience. 2010. V. 3. P. 599–607.
- 34 Sekine, S. Along-strike variations in short-term slow slip events in the southwest Japan subduction zone / S. Sekine, H. Hirose, K. Obara // JGR. 2010. V. 115. No 9. B00A27.
- 35 Wei M., Kaneko Y., Liu Y., McGuire J.J. Episodic fault creep events in California controlled by shallow frictional heterogeneity // M. Wei // Nature Geoscience. 2013. V. 6. P. 566–570.

- 36 Николаевский В. Н. Собрание трудов. Геомеханика. Том 3. Землетрясения и эволюция коры. Скважины и деформации пласта. Газоконденсат. М.-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Институт компьютерных исследований. 2012. 644 с.
- 37 Николаевский В.Н. Собрание трудов. геомеханика. Том 1. Разрушение и дилатансия. Нефть и газ. М.- Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Институт компьютерных исследований. 2010. 640 с.
- 38 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.
- 39 Ребецкий Ю.Л. Развитие метода катакластического анализа сколов для оценки величин тектонических напряжений // Доклады РАН. 2003. Т 400, № 3. С. 237-241.
- 40 Райс Дж. Механика очага землетрясения. Сер. Механика. Новое в зарубежной науке. М.: Мир. 1982. 217 с.
- 41 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.
- 42 Mallman E.P., Zoback M.D. Assessing elastic Coulomb stress transfer models using seismicity rates in southern California and southwestern Japan // Journal of Geophysical Research Solid Earth, 2007. V. 112(B3).
- 43 Mallman E.P., Zoback M.D. Assessing elastic Coulomb stress transfer models using seismicity rates in southern California and southwestern Japan // Journal of Geophysical Research Solid Earth, 2007. V. 112(B3).
- 44 Zoback M.L. First- and second modern pattern of stress in lithosphere: The World stress map project // J. Geophys. Res. 1992. V. 97, N B8. P. 11703–11728.
- 45 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, No. 3. P. 935–953.
- 46 Ganas A., Sokos E., Agalos A., Leontakianakos G., Pavlides S. Coulomb stress triggering of earthquakes along the Atalanti Fault, central Greece: Two April 1894 M6+ events and stress change patterns // Tectonophysics. 2006. V. 420. P. 357–369.
- 47 Pang Y. Stress evolution on major faults in Tien Shan and implications for seismic hazard // Journal of Geodynamics 2022. No 2. P. 153–154. DOI: 10.1016/j.jog.2022.101939
- 48 Ребецкий Ю.Л. Тектонические напряжения и прочность горных массивов. М.: Академкнига. 2007. 406 с.
- 49 Ребецкий Ю.Л., Сим Л.А., Маринин А.В. От зеркал скольжения к тектоническим напряжениям. Методики и алгоритмы. М.: ГЕОС. 2017. 234 с.
- 50 Rebetsky Yu.L., Polets A.Yu. The method of cataclastic analysis of discontinuous displacements. Moment Tensor Solutions - A Useful Tool for Seismotectonics / Editor Sebastiano D'Amico. Springer. Cham. 2018. 111-162. https://doi.org/10.1007/978-3-319-77359-9_6
- 51 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.
- 52 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.
- 53 Anderson E.M. The dynamics of faulting. Trans. Edinburgh, Geol., Sec(8). 1951. P. 387–402
- 54 Arthaud F. Methode de determination graphique des directions de raccourcissement, d'allogement et intermediaire d'une population de failles // Bul. Soc. geol. Fr. 1969. V. 7. P. 729–737.
- 55 Парфенов В.Д. К методике тектонофизического анализа геологических структур. // Геотектоника. 1984. № 1. С. 60–72.
- 56 Николаев П.Н. Методика тектонодинамического анализа. М.: Изд. Недр. 1992. 294 с.
- 57 Гинтов О.Б., Исай В.М. Некоторые закономерности разломообразования и методика морфокинематического анализа сколовых разломов // Геофиз. журнал. 1984. Т. 6, № 3. С. 3–10.
- 58 Гущенко О.И. Кинематический принцип реконструкции направлений главных напряжений (по геологическим и сейсмологическим данным) // ДАН СССР. Сер. геофиз. 1975. Т. 225, № 3. С. 557–560.
- 59 Юнга С.Л. О механизме деформирования сейсмоактивного объема земной коры. Изв. АН СССР сер. Физика Земли. 1979. С. 14–23.
- 60 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.
- 61 Angelier J. Sur l'analyse de mesures recueillies dans des sites failles: l'utilite d'une confrontation entre les methodes dynamiques et cinematiques // C. R. Acad. Sci. Paris. D. 1975. V 281. P. 1805–1808.
- 62 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. Vol. 89, NO B11. P. 9305–9320
- 63 Ребецкий Ю.Л. Напряженно-деформированное состояние и механические свойства природных массивов по данным о механизмах очагов землетрясений и структурно-кинематическим характеристикам трещин // Автореф. дис. док. физ.мат. наук. М.: Изд. ОИФЗ. 2003. 56 с
- 64 Ребецкий Ю.Л. Оценка относительных величин напряжений – второй этап реконструкции по данным о разрывных смещениях // Геофизический журнал. 2005. Т. 27. № 1. Киев. С. 39-54.
- 65 Byerlee J. D. Frictional characteristics of granite under high confining pressure // J. Geophys. Res. 1967. V. 72, N 14. P. 3639-3648.

- 66 Byerlee J.D. Brittle-ductile transition in rocks // *J. Geophys. Res.* 1968. V. 73, N 14. P. 4741–4750.
- 67 Brace W.F. Laboratory studies of stick-slip and their application to earthquakes // *Tectonophysics.* 1972. V. 14. P. 189–200.
- 68 Brace W.F. Volume changes during fracture and frictional sliding // *a review Pure and applied geophysics.* 1978. V. 116. P. 603–614.
- 69 Angelier J. From orientation to magnitude in paleostress determinations using fault slip data // *J. Struct. Geol.* 1989. V. 11, No 1/2. P. 37–49.
- 70 Ребецкий Ю.Л., Кузиков С.И. Тектонофизическое районирование активных разломов Северного Тянь-Шаня // *Геология и геофизика.* 2016. Т. 57, № 6. С. 1225–1250
- 71 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
- 72 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, No 1–4, Spec. Iss. P. 1–276.
- 73 Тихоцкий С.А., Татевосян Р.Э., Ребецкий Ю.Л., Овсяченко А.Н., Ларьков А.С. Караманмарашские землетрясения 2023 г. в Турции: сейсмическое движение по сопряженным разломам // *Доклады РАН.* 2023. Т. 511, № 2. С. 228–235
- 74 Ребецкий Ю.Л. Тектонофизическое районирование сейсмогенных разломов Восточной Анатолии и Караманмарашские землетрясения 06.02.2023 г // *Физика Земли.* 2023. № 6. С. 37–65. DOI: 10.1134/S1069351323060174
- 75 Смирнов В.Б., Петрушов А.А., Михайлов В.О. Об RTL-аномалии сейсмического режима перед землетрясением в Турции 06.02.2023 г. // *Физика Земли.* 2023. № 6. С. 122–132.
- 76 Mjachkin V.I., Brace W.F. Sobolev G.A., Dieterich J.H. Two models for earthquake forerunners. *Pure. Appl. Geophys.* 1975. Vol. 113. P. 169–181.
- 77 Scholz C.H., Sykes L.R., Aggarwal Y.P. Earthquake prediction: A physical basis // *Science.* 1973. V. 181. P. 803.
- 78 Brace W.F., Byerlee J.D. Stick-slip as a mechanism for earthquake // *Science.* 1966. Vol. 153. P. 990–992.
- 79 Добровольский И.П. Теория подготовки тектонического землетрясения. М.: Изд. ИФЗ РАН. 1991. 217 с.
- 80 Bullen K.E. On strain energy in Earth's upper mantle // *Trans. Amer. Geoph. Union.* 1953. V. 34, No 1. P. 107–116.
- 81 Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука. 2003. 269 с.
- 82 Гзовский М.В. Тектонофизическое обоснование геологических критериев сейсмичности (I и II) // *Изв. АН СССР. Сер. Геофиз.* 1957. № 2. С. 141–160, № 3. С. 273–283.
- 83 Гзовский М.В. Основы тектонофизики. М.: Изд. Наука. 1975. 535 с.
- 84 Benioff H. Earthquakes and rock creep. Т. 1. Creep characteristics of rocks and origin of aftershocks // *Bull. Seism. Soc Amer.* 1951. V. 41, No 1. P. 31–40.
- 85 Ризниченко Ю.В. Энергетическая модель сейсмического режима // *Изв. АН СССР. Физика Земли.* 1968. № 5. С. 3–9.
- 86 Уломов В.И., Мавашев Б.З. О предвестнике сильного тектонического землетрясения // *ДАН СССР.* 1967. Т. 176, № 2. С. 319–323.
- 87 Langbein J., Borchrdt R., Dreger D., Fletcher J., Hardebeck J.L., Hellweg M., Johnston M.J.S., Murray J.R., Nadeau R.M., Remer J., Treiman J.A. Preliminary report on the 28 September 2004 M 6.0 Parkfield, California earthquake // *Seism. R. Let.* 2005. V. 76, No 1, P. 10–26.
- 88 Lindh A.G. Success and failure at Parkfield // *Seism. R. Let.* 2005. V. 76, No 1. P. 3–6.
- 89 Багманова Н.Х., Миркин Е.Л. О самом «взрывном» периоде возникновения разрушительных землетрясений Тянь-Шаня // *Вестник Института сейсмологии НАН КР.* 2022. Т. 19, №1 С. 23–28
- 90 Ребецкий Ю.Л. Поле глобальных коровых напряжений Земли // *Геотектоника.* 2020. № 6. С. 3–24.
- 91 Ребецкий Ю.Л., Сычева Н.А., Сычев В.Н., Кузиков С.И., Маринин А.В. Напряженное состояние коры Северного Тянь-Шаня по данным сейсмической сети КНЕТ // *Геология и геофизика.* 2016. Т. 57, № 3. С. 496–520.
- 92 Ребецкий Ю.Л., Саньков В.А., Добрынина А.А. Районирование опасных разломов Байкальской рифтовой области по данным о кулоновых напряжениях, полученных из текторнофизической реконструкции напряжений // *Геодинамика и тектонофизика.* 2024 (в печати)
- 93 Завьялов А.Д. Параметр концентрации сейсмогенных разрывов как предвестник сильных землетрясений // *Вулканол. и сейсмол.* 1986. № 3. С. 58–71.
- 94 Любушин А.А. Циклические свойства сейсмического шума и проблема прогнозируемости сильнейших землетрясений на японских островах // *Геофизические процессы и биосфера.* 2018. Т. 17. №3.

Сведения об авторе:

Ребецкий Юрий Леонидович (корреспондентный автор) – доктор физ.-мат. наук, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН (г. Москва, Россия, эл.почта: reb@ifz.ru)

Автор туралы мәлімет:

Ребецкий Юрий Леонидович (корреспондент автор) – физ.-мат. Ғылымдарының докторы, О.Ю. Шмидт атындағы Жер физикасы институты. РАН (Мәскеу қ., Ресей, эл.пошта: reb@ifz.ru)

Information about author:

Rebetsky Yuri Leonidovich (corresponding author) – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia, email: reb@ifz.ru)

Поступила 01 апреля 2024

Принята 7 июня 2024