



## ALGORITHM FOR CALCULATING NEOTECTONIC STRESSES IN PLATFORM AREAS BY THE STRUCTURAL-GEOMORPHOLOGICAL METHOD

Yu.L. Rebetsky <sup>✉</sup>, L.A. Sim , A.V. Marinin 

Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, 10-1 Bolshaya Gruzinskaya St, Moscow 123242, Russia

**ABSTRACT.** An algorithm for calculating stress values proposed here is based on the results of reconstruction performed by L.A. Sim's structural-geomorphological method for platform areas. This method makes it possible to determine the orientation of the axes of principal stresses for the shear zones from the lineament analysis of satellite images and photographs and Gzovsky's palette, and to identify the lineaments characterizing the basement active faults which are covered by sediments. It is proposed that the dataset obtained will be subjected to the algorithm of the second-stage method of Cataclastic Analysis of faulting displacements, in which the Mohr diagram is used to calculate the stress values normalized for the cohesion strength of the massif. The further determination of the cohesion strength and absolute stress values is based on the data for lithostatic pressure and fluid pressure in the fracture-pore space of the massif (either measured or prescriptive). The stress calculation algorithm was tested on a small area (60 square km of satellite imagery) near the territorial district of Seversk – the southern border of the West Siberian Platform. The calculations have shown that with the fluid pressure variations ranging from hydrostatic values to twice higher than those, the cohesion strength of a rock mass at the base of the sedimentary cover (500 m depth) is in the range of 41.0 to 16.8 bar, and the level of maximum tangential stresses lies in the range of 75 to 31 bar.

**KEYWORDS:** satellite image; lineament; fault; fracture; strike-slip; principal stress axis; stress value; cohesion strength; fluid pressure; effective pressure; Mohr diagram; Mohr circle; structural geomorphological method

**FUNDING:** The work on the development of tectonophysical methods has been done in accordance with the state assignment for the Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences.

### RESEARCH ARTICLE

**Correspondence:** Yuri L. Rebetsky, [reb@ifz.ru](mailto:reb@ifz.ru)

Received: April 9, 2021

Revised: October 18, 2021

Accepted: November 12, 2021

**FOR CITATION:** Rebetsky Yu.L., Sim L.A., Marinin A.V., 2022. Algorithm for calculating neotectonic stresses in platform areas by the structural-geomorphological method. *Geodynamics & Tectonophysics* 13 (1), 0577. doi:10.5800/GT-2022-13-1-0577

## АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ВЕЛИЧИН НЕОТЕКТОНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ ПЛАТФОРМЕННЫХ ТЕРРИТОРИЙ В СТРУКТУРНО-ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКОМ МЕТОДЕ

Ю.Л. Ребецкий, Л.А. Сим, А.В. Маринин

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, 123242, Москва, ул. Большая Грузинская, 10, стр. 1, Россия

**АННОТАЦИЯ.** Предложен алгоритм расчета величин напряжений, базирующийся на результатах реконструкции, выполненной структурно-геоморфологическим методом Л.А. Сим для платформенных областей. Этот метод позволяет для зон сдвигания на основе линеаментного анализа космо- и фотоснимков и палетки Гзовского определять ориентацию осей главных напряжений и выделять линеаменты, характеризующие активные разломы фундамента, скрытые осадочным чехлом. Предлагается к совокупности таких данных применять алгоритм второго этапа метода катакластического анализа разрывных смещений, в котором с помощью диаграммы Мора производится расчет величин напряжений, нормированных на прочность сцепления массива. Далее для определения значения прочности сцепления и абсолютных величин напряжений используются данные о величине литостатического давления и давления флюида в трещинно-поровом пространстве массива (измеряется или директивно подбирается). Алгоритм расчета напряжений тестировался на небольшом участке (площадь космоснимка 60×60 км) вблизи территориального округа Северск – южного обрамления Западно-Сибирской платформы. Проведенные расчеты показали, что при вариации флюидного давления от гидростатических значений до вдвое бóльших прочность сцепления массива пород осадочного чехла у его подошвы (глубина 500 м) находится в пределах 41.0–16.8 бар, а уровень максимальных касательных напряжений – в диапазоне значений 75–31 бар.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** космический снимок; линеамент; разрыв; трещина; сдвиг; ось главного напряжения; величина напряжения; прочность сцепления; флюидное давление; эффективное давление; диаграмма Мора; круг Мора; структурно-геоморфологический метод

**ФИНАНСИРОВАНИЕ:** Работа в части развития методов тектонофизики выполнена в рамках госзадания Института физики Земли РАН.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

При разработке М.В. Гзовским методов реконструкции – инверсии напряжений из тектонических данных о трещинах и разрывах – не формулировалась задача оценки величин напряжений прямо в рамках создаваемых методов [Gzovsky, 1975]. В те годы М.В. Гзовский связывал интенсивность максимальных касательных напряжений с интенсивностью градиентов вертикальных движений.

Первые методы реконструкции или инверсии напряжений из геологических данных о разрывах со смещениями, созданные в СССР М.В. Гзовским и его учениками, опирались на данные о трещинах без замеров направлений смещений (методы П.Н. Николаева, В.Д. Парфенова, Л.М. Расцветаева). Метод сопряженных пар трещин самого М.В. Гзовского хотя и использовал данные о направлениях скольжения вдоль разрывов, но только для того, чтобы выделить сопряженные пары трещин для определения ориентации осей главных напряжений. Неизвестными оставались не только величины тензора напряжений, но и форма его эллипсоида, определяемая значениями коэффициента Лоде – Надаи.

Возникшие во второй половине 70-х годов прошлого века методы инверсии напряжений Арза [Arthaud, 1969], Кари и Бруне [Carey, Bruneier, 1974], Анжелье [Angelier, 1975], Гущенко [Gushchenko, 1975], Рэчез [Reches, 1978], Юнги [Yunga, 1979], Гепхарда и Форсис [Gephart, Forsyth,

1984], Майкла [Michael, 1984], Ляль [Lisle, 1987], Маррета и Альмендингера [Marrett, Allmendinger, 1990], исходными данными для которых являлись зеркала скольжения, уже позволяли определять не только ориентацию главных напряжений, но и форму эллипсоида напряжений. Т.е. появилась возможность определять девиатор напряжения, нормированный на величину максимальных касательных напряжений. Можно сказать, что из шести параметров, определяющих значения шести компонент тензора напряжений, удалось рассчитать четыре – три угла Эйлера для осей главных напряжений и значение коэффициента Лоде – Надаи. При этом два важнейших инварианта тензора напряжений – максимальное касательное напряжение и тектоническое давление (среднее напряжение с обратным знаком) – оставались неизвестными.

Дальнейшее развитие технологии инверсии напряжений привело к созданию тектонофизических методов, в рамках которых возникли алгоритмы оценки величин напряжений: метод Анжелье [Angelier, 1989], Рэчез [Reches, 1983], Майкла [Michael, 1987a, 1987b], Ребецкого [Rebetsky, 1997, 1999]. Во всех этих методах исходными для инверсии являлись данные о разрывах со смещениями.

В настоящее время в горном деле, поисковой геологии и строительстве ответственных промышленных объектов возникла насущная потребность получать

в рамках изучения конкретных геологических объектов данные не только об эллипсоиде напряжений, но и о величинах напряжений. В этой работе будет показана такая возможность для структурно-геоморфологического (СГ) метода реконструкции тектонических напряжений Сим [Sim, 1991] в районах со сдвиговым напряженным состоянием. Развитие этого метода было выполнено на примере инверсии напряжений южного обрамления Западно-Сибирской платформы. Центром района целенаправленных исследований является территориальный округ Северск, для которого крайне важно определение зон локализации деформаций и величин тектонических напряжений не с помощью локальных инструментальных измерений, а с использованием современных тектонофизических исследований, проведенных авторами.

## 2. ОСНОВНЫЕ ЗОНЫ ЛОКАЛИЗАЦИИ ДЕФОРМАЦИЙ

Под основными зонами локализации деформаций понимаются активные неотектонические и современные разломы. Для их выделения была составлена схема линеamentной тектоники на основе дешифрирования прямолинейных элементов рельефа – возможных новейших разломов фундамента (рис. 1).

Площадь снимка 60×60 км ограничена координатами E 84°18'–85°36', N 56°25'–56°51' (западная граница

проходит по р. Обь около 30 км вверх по течению от устья р. Томь, восточная – вблизи пос. Семилужки, северная граница – в 5 км южнее устья р. Томь, а южная – в 5 км на юг от г. Томска). Использовалась распечатка космоснимка в масштабе 1:122000, но качество космоснимка существенно превышало данный масштаб и позволяло детализировать объекты с разрешением до 1–3 м (1 пиксел ~30–50 см). Это позволяет распечатать его в масштабе 1:4000, в котором 1 пикселу 0.5 мм соответствуют 2 м.

Дешифрирование аэро- и космических снимков производилось визуально путем выделения прямолинейных элементов рельефа, разломную природу которых необходимо было доказать. Для доказательства разломной природы выделенных линеаментов производится дешифрирование мелких прямолинейных элементов рельефа, названных «мегатрещинами», вблизи выделенных линеаментов – возможных разломов согласно СГ методу [Sim, 1991].

На рис. 2 показана рабочая карта-схема отдешифрированных линеаментов, определяющих положение возможных разломов. Она состоит из 134 элементов протяженностью от 1 км до более 50 км. Для дальнейшей идентификации линеаментов произведено их сопоставление с разломами на тектонических картах района и с данными дешифрирования, полученными в работах предшественников. На схеме также показаны

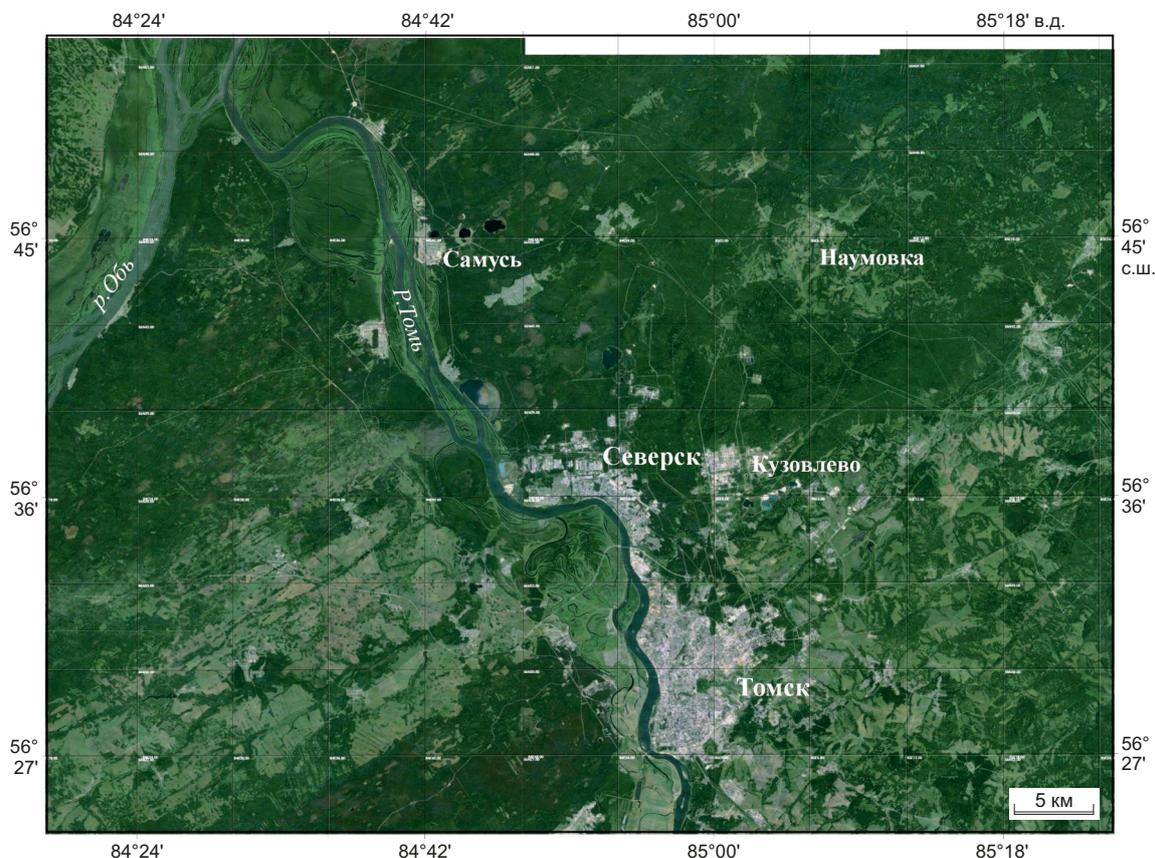


Рис. 1. Космический снимок южной части Томской области.

Fig. 1. A satellite image of the southern Tomsk Region.

четыре разлома (Наумовский, Кузовлевский, Северный и Городской), выделенные по геолого-геофизическим данным вблизи г. Северска [Zubkov et al., 2005; Glinskiy et al., 2013].

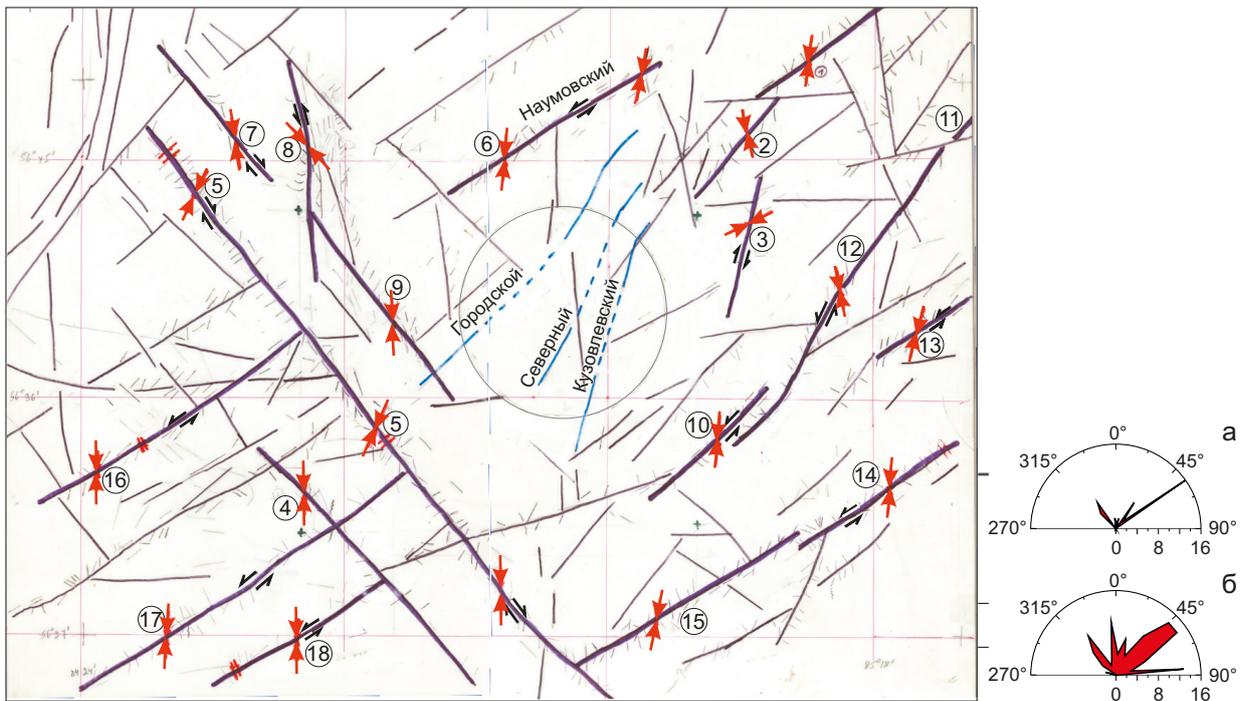
Роза-диаграммы, представленные на рис. 2, показывают существенно меньший диапазон углов простираения для линеаментов, которые в дальнейшем были выделены как активные структуры (диаграмма (а)), в сравнении с диапазоном углов простираения для общего числа выделенных линеаментов (диаграмма (б)).

Следующей задачей было распознавание среди этих линеаментов тех, которые соответствуют зонам локализации деформаций в осадочном чехле, связанных с разломами фундамента, и их классификация по степени активности на современном этапе.

В СГ методе эта фаза работ связана с выделением вблизи крупных линеаментов мелких прямолинейных элементов рельефа – «мегатрещин», которые могут соответствовать оперяющим разрывам в зоне разлома. Согласно обобщению результатов моделирования зон

сдвигания [Gzovsky, 1975], «мегатрещины» отвечают двум сопряженным R-сдвигам и одному отрыву, они образуют характерную триаду, распознавание которой является основой СГ метода. Поскольку фактическим материалом для этого метода служат данные дешифрирования элементов рельефа, возраст восстановленных СГ методом стресс-состояний принимается за новейший. Выраженность оперяющих трещин в четвертичных отложениях позволяет считать, что выделенные сдвиги активны и на современном этапе. При дешифрировании мегатрещин необходимо выделять отдельным знаком прямолинейные элементы рельефа, идентифицирующиеся со сколами (практически идеально прямые мегатрещины) и с отрывами, которые определяются по сильно меандрирующимся водотокам, по вытянутым мелким озерам или прямолинейным берегам болот и озер.

Наличие вертикальной составляющей перемещения по разлому в новейший этап традиционно определяется по гипсометрическим отметкам в разных крыльях



**Рис. 2.** Рабочая карта-схема результатов «ручного» дешифрирования космоснимка (см. рис. 1) с изображением линеаментов (длинные линии) и «мегатрещин» (короткие тонкие линии вблизи длинных).

Линеаменты с «мегатрещинами», отвечающими технологии распознавания активных разрывов фундамента по СГ методу, выделены утолщенными линиями. Для них показаны ориентации осей наибольшего сжатия (красные стрелки) и направления смещения бортов разрывов (черные стрелки). Цифрами проставлены порядковые номера активных структур. На схеме дополнительно сплошными и пунктирными линиями (обведены тонкой круговой линией) синего цвета показаны разломы по работам [Zubkov et al., 2005; Glinskiy et al., 2013]. Справа внизу: (а) – роза-диаграмма распределения нормалей линеаментов – активных структур, (б) – роза-диаграмма нормалей линеаментов, не включенных в активные поверхностные структуры.

**Fig. 2.** A sketch map for the results of the manual interpretation of the satellite image (see Fig. 1) showing the lineaments (long lines) and megafractures (short thin lines nearby).

The lineaments with megafractures which can be used for identification of active basement faults in accordance with the SG method are highlighted in thick lines. The orientation of axes of maximum compression (red arrows) and direction of fault-side displacements (black arrows) are shown therefor. The figures present the ordinal numbers of active structures. The additional blue solid and dashed (in a thin-line circle) lines show the faults after [Zubkov et al., 2005; Glinskiy et al., 2013]. Right below: (a) – rose diagram of the distribution of normal lineaments – active structures; (b) – rose diagram of normal lineaments which are not a part of active surface structures.

разлома, а также по развитию мегатрещин, параллельных простиранию разлома, так как по данным физического моделирования в зоне сбросов развиваются оперяющие разрывы, в подавляющем большинстве субпараллельные основной плоскости разлома [Sherman et al., 1983]. Необходимо еще раз повторить, что линеаменты, обладающие по результатам дешифрирования системами мегатрещин в виде сколов и отрывов, на поверхности еще не выглядят как разрыв со смещением. Тем не менее сгущение мегатрещин в зоне влияния таких «разломов» позволяет выделять линеаменты – предполагаемые разрывные нарушения. Но в фундаменте существуют разрывы в виде сдвига по простиранию, которые и формируют на поверхности систему оперяющих мегатрещин. Необходимо иметь в виду, что вертикальная амплитуда перемещений в изучаемом районе крайне мала, что позволяет принимать доминирование сдвиговых перемещений по разломам, приводящих к закономерным ориентировкам мегатрещин.

На последнем этапе дешифрирования линеаментов производится сопоставление выделенных разломов с разломами на тектонических картах района и с данными дешифрирования предшественников.

### 3. ЛИНЕАМЕНТНАЯ ТЕКТОНИКА И АКТИВНЫЕ РАЗЛОМЫ ФУНДАМЕНТА

Применимость к полученным по результатам дешифрирования линеаментов алгоритма инверсии напряжений СГ метода связана с геодинамическим типом напряженного состояния в виде горизонтального сдвига (главный постулат метода). Для исследуемого региона такой тип напряженного состояния из сейсмологических данных о механизмах очагов землетрясений получен для коры территорий, расположенных в 400–600 км к югу, а также из данных по другим районам Западной Сибири [Zhalkovsky, Muchnaya, 1975; Zhalkovsky et al., 1995; Rebetsky et al., 1997; Gogonenkov et al., 2007; Sim, 2000; Sim, Bryantseva, 2007].

В результате анализа линеаментного поля и реконструкции неотектонических напряжений в районе работ из 134 линеаментов было выделено 18 в качестве зон локализации дизъюнктивно-пликативных деформаций. Эти зоны в рамках СГ метода определяются как результат проявления сдвигового движения в активном разломе фундамента. Будем далее их именовать как активные поверхностные структуры (АПС).

Следует обратить внимание на то, что СГ метод предполагает, что для осадочного чехла, в котором имеет место механизм горизонтального сдвига, формирование разлома происходит как снизу от фундамента, так и сверху [Sim, 1991]. Это вторая гипотеза СГ метода, которая на самом деле может рассматриваться как утверждение, подтвержденное результатами физического и математического моделирования зон сдвига [Rebetsky, 1987, 1988; Mikhailova, 2007; Rebetsky, Mikhailova, 2011, 2014].

По результатам обработки для этих АПС было определено 22 ориентировки осей сжатия (для протяженных

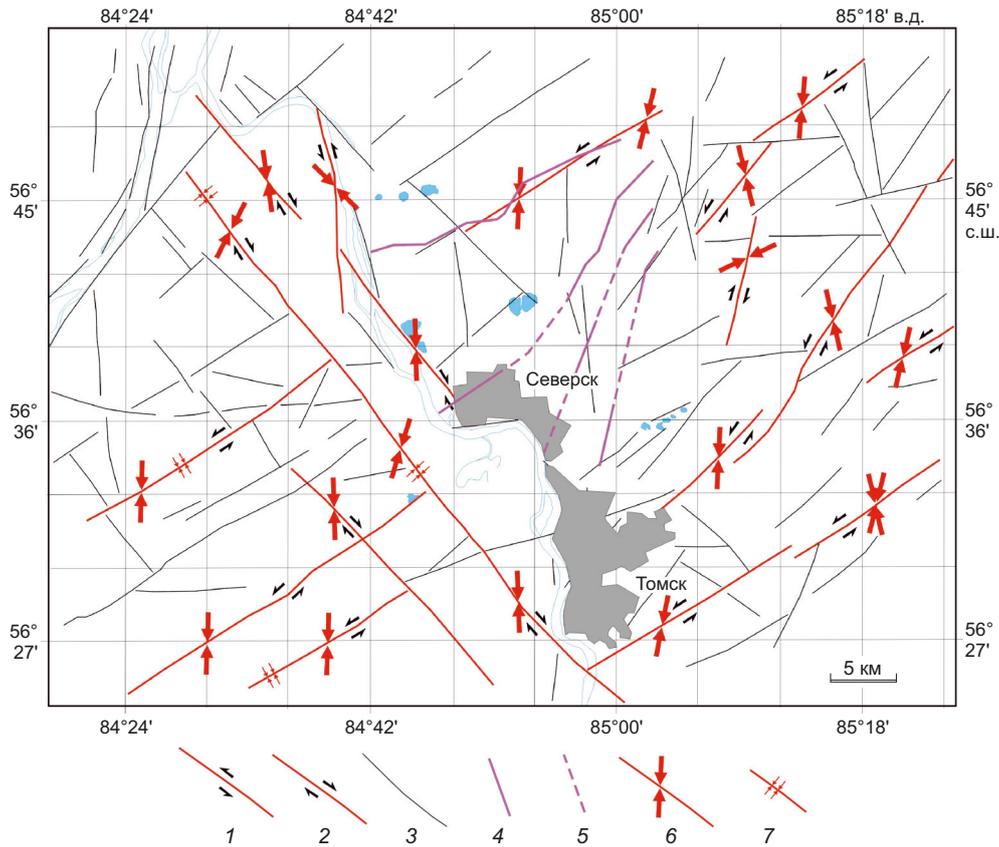
линеаментов выполнялось более одного определения напряжений; ориентация осей сжатия наносилась на участок АПС с выраженной триадой оперяющих мегатрещин) в горизонтальной плоскости (рис. 3) вдоль наиболее крупных линеаментов северо-западного, северо-восточного простирания. Подавляющее большинство осей сжатия субмеридиональны. АПС северо-западного простирания являются правыми, а северо-восточного простирания – левыми сдвигами. Единственная АПС субмеридионального простирания, по которой формировалась долина р. Томь в районе пос. Самусь, определена как левый сдвиг. Левый сдвиг по долине р. Самусь практически идеально совпадает с линеаментом, выделенным А.И. Кожуриным [Kozhurin, 2013], и с Наумовским разломом с обобщенным ВСВ простиранием [Zubkov et al., 2005; Glinskiy et al., 2013].

Нами был проведен анализ карт-схем линеаментов, полученных другими авторами в рамках обследования сейсмотектонической опасности ряда промышленных объектов вблизи г. Северска. Два левых сдвига с выдержанным простиранием и минимальным расстоянием между ними – активные разломы ВСВ простирания непосредственно на юго-восток от г. Томска (самые юго-восточные разломы на нашей обзорной схеме), совпадают с линеаментами на схеме Н.В. Лукиной (см. в работе [Trifonov et al., 1993]).

Необходимо отметить, что группа АПС СЗ простирания, сконцентрированная на западе района исследований, может составлять единую региональную АПС. Аналогично АПС с СВ простиранием на юго-западе и северо-востоке района – единая региональная АПС такого же простирания. Эти АПС выделены в качестве разломов на изданной карте новейшей тектоники масштаба 1:5000000 [Neotectonic Map..., 1997].

Сопоставление с разломами фундамента, выделенными в районе по геолого-геофизическим данным [Zubkov et al., 2005; Glinskiy et al., 2013], показало удовлетворительную корреляцию Наумовского разлома с установленным нами левым сдвигом ВСВ простирания на севере района. Остальные три разлома фундамента активизировались отдельными отрезками, при этом центральные части разломов вблизи объекта не нашли отражения в рельефе. Это может быть вызвано тем, что в работах [Zubkov et al., 2005; Glinskiy et al., 2013] разломы определены как надвиги, по которым осадочный чехол Западно-Сибирской плиты ступенчато погружается на северо-восток. Центральные части надвигов, как правило, имеют наиболее пологий угол. Соответственно, в сдвиговом поле напряжений новейшего этапа деформирования они не активизировались из-за неблагоприятной ориентировки к осям главных нормальных напряжений.

Неотектонический характер выделенных АПС определяется, с одной стороны, тем, что большинство мегатрещин дешифрировано в аллювиальных и делювиальных четвертичных отложениях, а с другой – соответствием ориентировок осей сжатия, восстановленных СГ методом, установленным по механизмам очагов



**Рис. 3.** Схема АПС и других дешифрованных линеаментов юга Томской области. 1–2 – АПС: 1 – левые, 2 – правые сдвиги; 3 – линеаменты, разломная природа которых СГ методом не доказана; 4–5 – разломы, выделенные предшественниками по геолого-геофизическим данным [Zubkov et al., 2005; Glinskiy et al., 2013]: 4 – выраженные, 5 – не выраженные на дневной поверхности; 6–7 – неотектонические напряжения: 6 – оси сжатия, 7 – дополнительное сжатие, нормальное к плоскости разлома.

**Fig.3.** A scheme of ASS and other interpreted lineaments of the southern Tomsk Region. 1–2 – ASS: 1 – sinistral, 2 – dextral strike-slips; 3 – lineaments whose faulting nature was not proved by the SG method; 4–5 – faults identified by the predecessors from the geological-geophysical data [Zubkov et al., 2005; Glinskiy et al., 2013]: 4 – exposed, 5 – unexposed to the surface; 6–7 – neotectonic stresses: 6 – compression axes, 7 – additional compression normal to the fault plane.

землетрясений осям сжатия в эпицентрах ближайших к району землетрясений. Т.е. можно сделать вывод, что АПС, выделенные СГ методом, отражают движения скрытых разломов фундамента, которые стали активны только на современном этапе и поэтому еще не привели к формированию единой вертикальной разрывной структуры от кровли фундамента до земной поверхности.

**4. ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РЕГИОНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ АПС**

Здесь будет дана тектонофизическая интерпретация представленных в предыдущем разделе данных о простирации АПС и об ориентации главных осей напряжений в региональном масштабе усреднения. Такой анализ позволит понять, насколько качественно для данного района были выделены активные разломы не только в наших исследованиях, но и в исследованиях других авторов.

По результатам дешифрирования космоснимков и анализа выделенных на них линеаментов СГ методом

было установлено, что оси максимального сжатия  $\sigma_3$  имеют субмеридиональную направленность, а минимальное сжимающее главное напряжение (девиаторное растяжение)  $\sigma_1$  ориентировано субширотно при субгоризонтальном положении обеих этих осей. Вариабельность азимутов локальных осей максимального сжатия для АПС находится в диапазоне значений от +60 до -45°. Оценка средней ориентации дает значение азимута регионального максимального сжатия около 8° (ССВ).

Третья ось промежуточного главного напряжения  $\sigma_2$  ориентирована субвертикально, т.е.  $\sigma_2 = \sigma_{zz}$ . Большое число данных *in situ* измерений, выполненных в «горном деле», показывает, что эта компонента напряжений в верхних горизонтах коры (глубина до 3–5 км) близка к величине литостатического давления  $\sigma_{zz} = -p_{lt}$  (вес столба горных пород на данной глубине  $p_{lt} = \rho_c g z$ ,  $\rho_c$  – плотность горных пород верхней части коры,  $z$  – вертикальная координата, направленная вниз).

При проведении тектонофизического анализа данные об ориентации осей главных напряжений следует

дополнить значением коэффициента Лоде – Надаи  $\mu_\sigma$ , определяющим вид эллипсоида напряжений. Из второй гипотезы СГ метода (субвертикальное продолжение АПС до кровли фундамента), подтвержденной в математических расчетах и физическом эксперименте, следует, что значение этого коэффициента близко к нулю ( $\mu_\sigma=0$ ), а тензор напряжений и деформации отвечают чистому сдвигу.

В рамках СГ метода выделяется часть линеаментов, полученных по результатам дешифрирования космоснимков. Эти линеаменты, или АПС, определяются как проявление активных разрывов – разломов кристаллического фундамента. Поскольку здесь имеет место геодинамический тип напряженного состояния горизонтального сдвига, эти разломы определяются как сдвиги по простиранию, имеющие субвертикальное погружение. Будем далее выполнять анализ этих разломов в фундаменте, опираясь на то, что их морфологические параметры совпадают с параметрами АПС.

Таким образом, для исследуемого района известна ориентация осей главных напряжений и активных разрывов фундамента. Этот тип данных является достаточным для применения элементов метода катакластического анализа разрывных смещений [Rebetsky, 2007]. Цель этого анализа:

- 1) проверить, удовлетворяют ли полученным данным об ориентации осей главных напряжений:
  - а) АПС, выделенные СГ методом из общей совокупности линеаментов, дешифрированных по космоснимкам;
  - б) все совокупности линеаментов, дешифрированных по космоснимкам;
  - в) активные разломы исследуемого района, выделенные ранее разными авторами;
- 2) произвести тектонофизическое районирование выделенных активных разломов в фундаменте по степени их опасности;
- 3) получить данные о величинах напряжений, действующих в верхней части кристаллического фундамента земной коры.

Будем далее представленную выше часть расчета СГ метода, позволяющую выявить АПС и ориентацию максимального сжатия регионального масштаба, именовать как первый этап СГ метода.

### 5. ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКАЯ ПРОВЕРКА АПС – РАЗЛОМОВ ФУНДАМЕНТА НА ДИАГРАММЕ МОРА

Построение редуцированной диаграммы Мора. Для решения перечисленных выше задач выполнялся расчет нормальной  $\sigma_{mn}$  и касательной компонент  $\tau_{ns}$  напряжений для всех линеаментов, выделенных на рис. 2 в предположении, что они так же, как и АПС, имеют субвертикальное продолжение в осадочном чехле:

$$\begin{aligned} \sigma_{mn} &= \sigma_0 + \tau \left[ (1 - \mu_\sigma) \ell_{1n}^2 - (1 + \mu_\sigma) \ell_{3n}^2 + \mu_\sigma \right], \\ \tau_{ns} &= \tau \left[ (1 - \mu_\sigma) \ell_{1n} \ell_{1s} - (1 + \mu_\sigma) \ell_{3n} \ell_{3s} \right] \end{aligned} \quad (1)$$

при  $\sigma_0 = (\sigma_1 + \sigma_3) / 2 = -(p + \tau \mu_\sigma) \ell_{3n}^2 + \mu_\sigma$ .

Здесь  $\ell_{in}$  и  $\ell_{is}$  – направляющие косинусы вектора нормали ( $\mathbf{n}$ ) к трещине и направления борозды скольжения ( $\mathbf{s}$ ) в системе координат, связанной с главными осями напряжений  $\sigma_i$  ( $i=1, 2, 3$ ),  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$  (напряжения растяжения являются положительными). Используя ранее высказанное предположение о том, что  $\mu_\sigma=0$ , а также тот факт, что вектор нормали  $\mathbf{n}$  к плоскости линеамента, вектор скольжения  $\mathbf{s}$  и оси главных напряжений  $\sigma_i$  и  $\sigma_j$  лежат в горизонтальной плоскости, выражения для нормальных и касательных напряжений можно переписать в более простой форме:

$$\sigma_{mn} = \sigma_0 + \cos 2\alpha, \tau_{ns} = \tau \sin 2\alpha, \sigma_0 = -p \quad (2)$$

при  $\ell_{1n} = \cos \alpha, \ell_{1s} = \sin \alpha, \ell_{3n} = -\sin \alpha, \ell_{3s} = \cos \alpha$ .

При расчете производилось разделение линеаментов на участки около 1 км, так как визуальный анализ показывает достаточно высокую вариацию азимутов простирания линеаментов по их длине. Это особенно касается протяженных линеаментов, часть из которых была определена как активные разрывы.

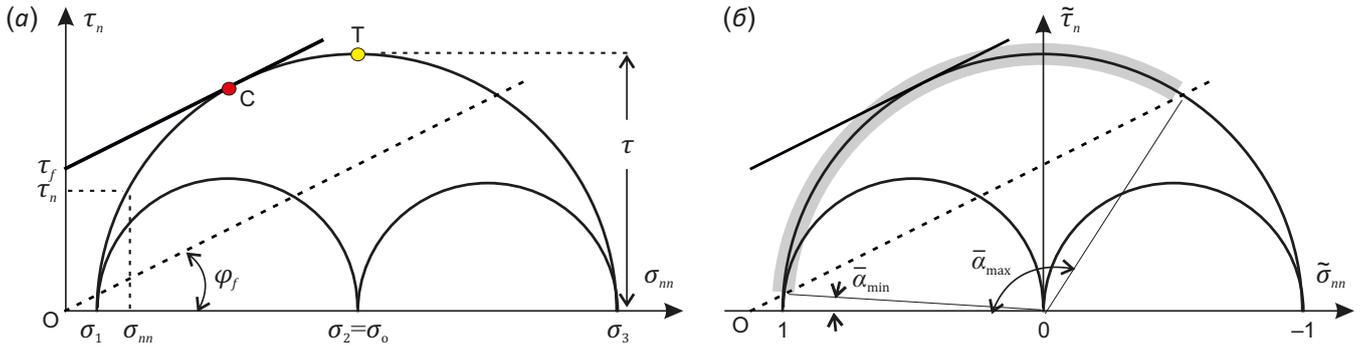
Далее производилось построение диаграммы Мора, на которой отмечались положения точек с напряженными состояниями, отвечающими отдельным участкам разломов. На рис. 4 кроме кругов Мора некоторого напряженного состояния  $\sigma_i$  ( $i=1, 2, 3$ ) показаны линии прочности трещиноватых массивов в том приближении, как они используются в алгоритме катакластического метода. Активизация ранее существовавших сколов происходит для напряженных состояний, попадающих в полосу хрупкого разрушения, расположенную между этими линиями. Внутри этой линии кулоновы напряжения ( $\tau_c$ ) положительные, ниже линии минимального сопротивления трения – отрицательные:

$$\tau_c = \tau_n + k_f \sigma_{mn} \leq \tau_f. \quad (3)$$

Здесь  $\tau_f$  и  $k_f$  – соответственно прочность сцепления и коэффициент трения на разрывах. В катакластическом методе считается, что коэффициент внутреннего трения ( $k_f$ ), определяющий наклон линии предела прочности на диаграмме Мора, равен  $k_f$ .

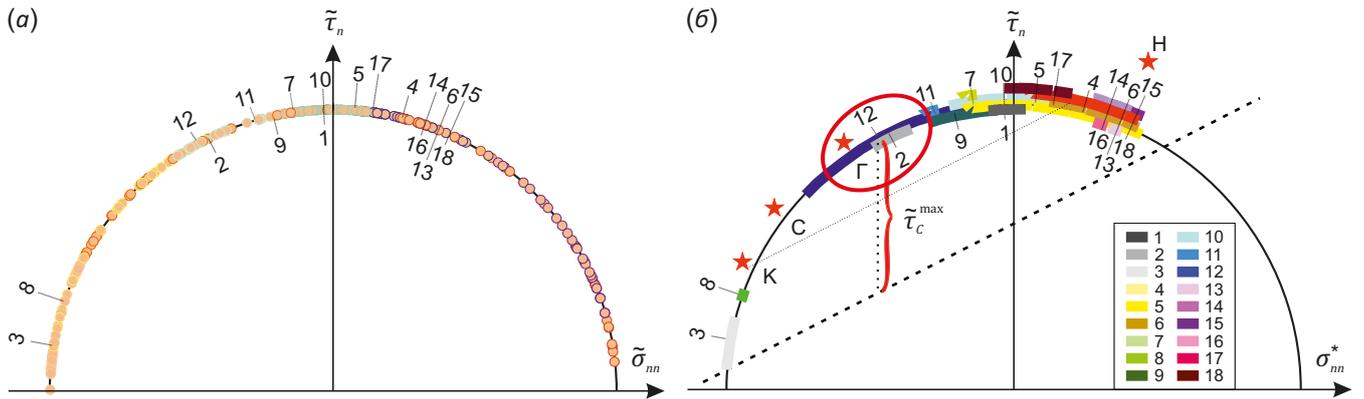
Важно отметить, что параметры прочности в выражении закона Кулона – Мора (3) отвечают их эффективным значениям в масштабе усреднения напряжений. В случае исследуемого региона масштаб усреднения напряжений вблизи линеаментов, выделенных СГ методом, составлял 5–10 км по латерали, а усреднение напряжений для всего региона, данные о которых используются на втором и третьем этапах расчета, соответствует 30–50 км.

Максимальные значения кулоновых напряжений достигаются на плоскости скалывания (плоскость максимального внутреннего трения – точка С на рис. 4, а). В рамках упрощения предела прочности в виде линии, параллельной линии минимального сопротивления трения, кулоновы напряжения равны сброшенным касательным напряжениям  $\Delta \tau_n$ . Таким образом, дефекты прочности, имеющие ориентацию, близкую



**Рис. 4.** Диаграмма Мора в классическом (а) и редуцированном (б) вариантах. Сплошная наклонная линия – предел прочности; пунктирная линия – минимальное сопротивление трения; О – начало координат на диаграмме Мора; С – плоскость скальвания; Т – площадка действия максимальных касательных напряжений,  $\bar{\alpha}_{min} \leq \bar{\alpha} \leq \bar{\alpha}_{max}$  – диапазон углов, определяющих положение точек вдоль большого круга Мора для активных вертикальных разрывов для режима горизонтального сдвига (выделен серой утолщенной дугой). Угол  $\varphi_f$  определяет значение коэффициента трения на разрывах  $k_f = \text{tg}\varphi_f$ . На диаграмме Мора направо откладываются отрицательные значения нормальных напряжений (растяжение положительно).

**Fig. 4.** The Mohr diagram in its classic (a) and reduced (b) versions. An oblique solid line – limit of strength; a dashed line – minimum friction resistance; O – origin of coordinates in the Mohr diagram; C – shear plane; T – maximum shear zone,  $\bar{\alpha}_{min} \leq \bar{\alpha} \leq \bar{\alpha}_{max}$  – a range of angles determining the position of points along the large Mohr circle for vertical displacements along active faults in the horizontal shear mode (highlighted by a grey thick arc) Angle  $\varphi_f$  determines the value for coefficient of fault friction  $k_f = \text{tg}\varphi_f$ . The Mohr diagram on the right shows the negative normal stress values (the extension is positive).



**Рис. 5.** Тектонофизический анализ прямолинейных участков линеаментов и разломов на редуцированной диаграмме Мора. (а) – все дешифрованные линеаменты; (б) – АПС и четыре разлома Наумовский (Н), Кузовлевский (К), Северский (С), Городской (Г). Для АПС вдоль большого круга Мора показаны сегменты дуг, отвечающие диапазону изменения напряжений вдоль них, связанному с изменением азимутов простирания. Номера линеаментов, определенных как АПС, и символы Н, К, С, Г (звездочки) для четырех разломов вдоль дуги большого круга показаны для напряжений, отвечающих средним значениям азимутов их простирания.

Внизу справа – таблица, показывающая соответствие цвета диапазона значений кулоновых напряжений АПС ее номеру. Штриховая пунктирная линия, определяющая минимальное сопротивление трения, проведена через крайние точки АПС. Линия точечного пунктира делит дугу круга Мора на сегменты высокого и низкого уровня кулоновых напряжений (3). Эллипсом красного цвета показана область наибольшего уровня кулоновых напряжений  $\tau_c$  в которую попали АПС № 2, 12 и разлом Городской.

**Fig. 5.** Tectonophysical analysis of straight lineaments and faults in the reduced Mohr diagram. (a) – all the lineaments interpreted; (b) – ASS and four faults: Naumosky (H), Kuzovlevsky (K), Seversky (C), and Gorodskoy (Gamma). For ASS along the large Mohr circle, shown are the arc segments falling within the range of the stress variations thereon, which is related to the strike-azimuth variations. The numbers of the lineaments, determined as ASS, and H, K, C and Gamma symbols (asterisks) for four faults along the arc of the large circle are shown for the stresses corresponding to the average values of their strike azimuths.

The table on the bottom right shows the correspondence between the color of the range of values for the Coulomb stress in ASS and its number. A dot-dash line determining the minimum friction resistance is drawn through the extreme points of ASS. A dotted line divides the arc of the Mohr circle into segments of high and low Coulomb stress (3). A red ellipse stands for the area of the maximum Coulomb stresses  $\tau_c$  which involves ASS № 2 and 12, and the Gorodskoy fault.

к плоскости скалывания ( $\pm 15^\circ$ ), наиболее подвержены активизации. Вдоль этих плоскостей трещин наблюдаются наибольшие смещения (при близких характерных размерах).

Согласно классическим положениям механики (2), подобное построение требует данных не только об угле  $\alpha$ , определяющем отклонение нормали к линейентам от оси наименьшего сжатия  $\sigma_1$ , но и о величине максимального касательного напряжения  $\tau$  и изотропного давления  $p$  (рис. 4, а).

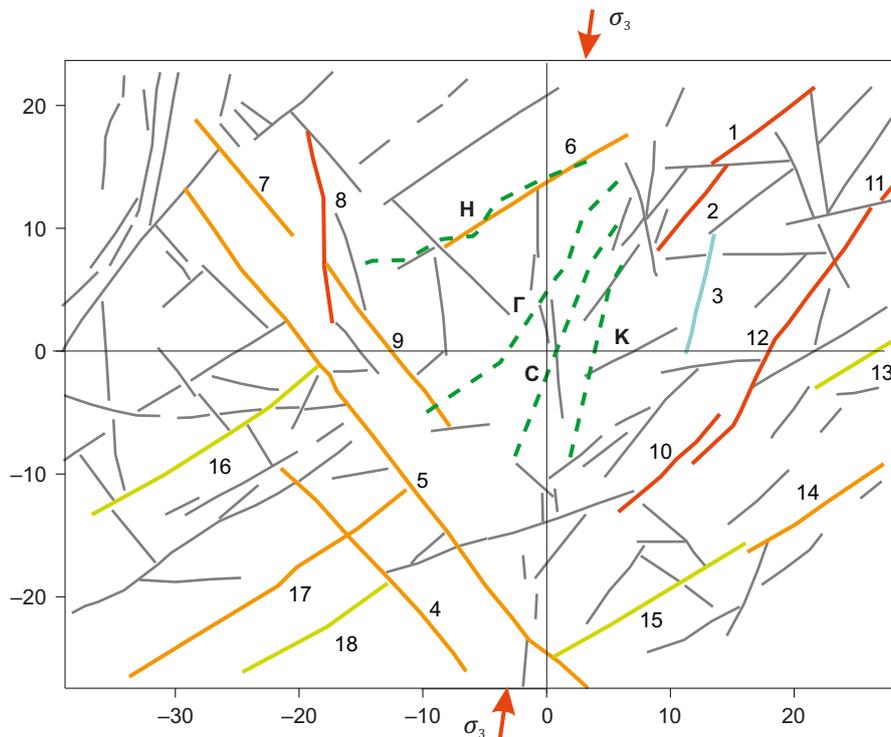
Как известно,  $\tau$  определяет радиус большого круга Мора, построенного на двух главных напряжениях  $\sigma_1$  и  $\sigma_3$ , а давление  $p$  в данном случае определяет положение его центра  $\sigma_o = (\sigma_1 + \sigma_3) / 2$ . В рамках катакластического метода [Rebetsky, 2007] разработан алгоритм построения редуцированной диаграммы Мора, в которой девиаторные компоненты тензора напряжений нормируются на  $(\tilde{\tau}_{ns} = \tau_{ns} / \tau)$ , а из нормальных напряжений вычитается значение напряжений  $\sigma_o$  ( $\tilde{\sigma}_{nn} = (\sigma_{nn} - \sigma_o) / \tau$ ). Таким образом, большой круг Мора совмещается с началом координат моровской области, а его радиус становится равным единице. На редуцированной области Мора выражения (2) переписать в следующем виде:

$$\tilde{\sigma}_{nn} = \cos \bar{\alpha}, \tilde{\tau}_{ns} = \sin \bar{\alpha} \text{ при } \bar{\alpha} = 2\alpha. \quad (4)$$

Таким образом, для сдвигового напряженного состояния и субвертикальных разломов из (4) следует очень

простая технология построения на редуцированном большом круге Мора точек, характеризующих напряжения на различных участках линейентов (рис. 4, б). Необходимо вдоль редуцированного большого круга Мора от точки +1 по часовой стрелке отложить удвоенный угол  $\alpha$ , который определяет разницу между азимутами простираения АПС и напряжения наибольшего сжатия ( $\sigma_3$ ), что эквивалентно разнице между азимутами нормали к АПС и напряжения наименьшего сжатия ( $\sigma_1$ ). Проекция на вертикальную ось дает редуцированное значение касательных напряжений вдоль участка линейента (АПС), а проекция на горизонтальную ось определяет редуцированные нормальные напряжения.

Следует заметить, что требование расположения точек для напряженных состояний выделяемых линейентов на дуге большого круга Мора определяется гипотезой о вертикальности погружения зон локализации деформаций в осадочном чехле. Математические модели зон горизонтального сдвига, выполненные в работах [Rebetsky, Mikhailova, 2011, 2014; Stefanov et al., 2014], показали, что эти зоны имеют достаточно сложное строение. Они могут разделяться на две V-образные узколокализованные структуры течения отклонением в погружении от вертикали в  $5-10^\circ$ . При учете этого фактора точки линейентов могут располагаться чуть ниже дуги большого круга Мора.



**Рис. 6.** Карта линейентов (серый цвет) и АПС, для которых выполнено районирование по степени интенсивности кулоновых напряжений с повышением от светло-коричневого к розовому и красному согласно рис. 5, б. Зеленым пунктиром показаны разломы по работам [Zubkov et al., 2005; Glinskiy et al., 2013].

**Fig. 6.** A map of lineaments (grey color) and ASS zoned in accordance with the degree of the Coulomb stress intensity increasing from the light-brown to pink and red, as presented in Fig. 5, б. A green dashed line shows the faults after [Zubkov et al., 2005; Glinskiy et al., 2013].

На рис. 5, а, показано расположение точек, отвечающих напряженным состояниям участков всех линеаментов (см. рис. 2), дешифрованных по аэрофотоснимку (см. рис. 1). В зависимости от степени нелинейности каждый из линеаментов мог быть разбит на несколько участков. Для всех таких участков были рассчитаны углы их простирания с осью максимального сжатия  $\sigma_3$ , что эквивалентно углу между их нормалью и осью минимального сжатия  $\sigma_1$ . Согласно способу, указанному выше, на основе значений этих углов наносились точки вдоль дуги большого круга Мора.

Как видно из рис. 5, а, точки напряженных состояний всех линеаментов полностью покрывают дугу большого круга Мора (см. роза-диаграмму (а) рис. 2 для простирания всех линеаментов). Это означает, что в данной совокупности присутствует определенное число линеаментов, нормали которых близки к простиранию оси максимального сжатия (азимут  $8^\circ$ ). Подобные линеаменты не могут быть охарактеризованы как зоны локализованного горизонтального сдвига, так как для таких направлений напряженные состояния расположены ниже линии минимального сопротивления трения и кулоновы напряжения здесь отрицательные (см. рис. 4).

На рис. 5, б, при построении редуцированной диаграммы Мора использованы только АПС и четыре разлома, определенные как активные согласно [Zubkov et al., 2005; Glinskiy et al., 2013] (см. роза-диаграмму (а) рис. 2 для простирания всех линеаментов). Видно, что точки участков АПС покрывают лишь часть дуги. Для этих точек  $\bar{\alpha}_{\min} = 4^\circ, \bar{\alpha}_{\max} = 122^\circ$ , что определяет диапазон угла, характеризующего отклонение нормалей АПС от оси минимального сжатия  $2.5^\circ \leq \alpha \leq 75^\circ$ . Проведенная на редуцированной диаграмме Мора штрихпунктирная линия имеет угол с горизонтальной осью  $\varphi_f = 27^\circ$ . Отсюда можно рассчитать важный прочностной параметр породного массива  $k_f = 0.51$ . Это значение коэффициента сухого трения соответствует результатам экспериментов на образцах горных пород [Byerlee, 1978; Brace, 1978] и результатам тектонофизического анализа напряжений и прочности в природных горных массивах, выполненного по сейсмологическим данным [Rebetsky, 2007].

Ранее выделенные активные разломы Наумовский, Кузовлевский, Северский и Городской находятся в диапазоне углов простирания, соответствующих достаточно высокому уровню положительных значений кулоновых напряжений, поэтому как в случае сейсмогенного развития хрупкого разрушения, так и при медленном, крипповом формировании разрывных деформаций наиболее опасным из этих разломов является Городской. Наименее опасными являются разломы Наумовский, Кузовлевский.

На рис. 6 выполнено районирование АПС по уровню кулоновых напряжений  $\tau_c$ . Из АПС наиболее опасными в порядке снижения уровня кулоновых напряжений являются 12, 2, 11, 9, 7, 10, 1. Их плоскости отклонены от оси наибольшего сжатия на углы от  $26$  до  $44^\circ$ . К наименее

опасным относятся АПС с номерами 3, 15 и 18 с углами их простирания с осью  $\sigma_3$  в  $5$  и  $51^\circ$  соответственно.

### 6. ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА УРОВНЯ НАПРЯЖЕНИЙ В КРИСТАЛЛИЧЕСКОМ ФУНДАМЕНТЕ

**Второй этап СГ метода.** В результате применения СГ метода были получены данные об ориентации осей главных напряжений на локальном и региональном уровне. Кроме этого, на редуцированной диаграмме Мора получено распределение совокупности напряженных состояний, отвечающих АПС, для ориентации осей главных напряжений регионального масштаба усреднения. Для определения неизвестных величин максимальных касательных напряжений и изотропного давления далее будут использованы некоторые положения катакластического метода и взаимосвязь этих инвариантов тензора напряжений с главными напряжениями:

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= -p + \tau(1 - \mu_\sigma / 3), \quad \sigma_2 = -p + \frac{2}{3}\tau\mu_\sigma, \\ \sigma_3 &= -p - \tau(1 + \mu_\sigma / 3). \end{aligned} \tag{5}$$

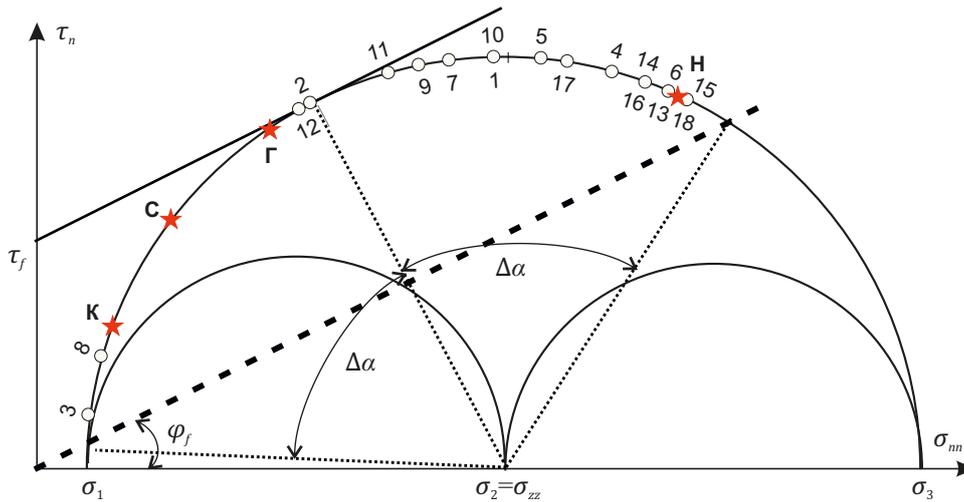
Согласно алгоритму, разработанному в рамках катакластического метода [Rebetsky, 2007], пересечение линии минимального сопротивления трения с горизонтальной координатной осью дает положение начала координат. Определив таким образом начало координат и переместив в него вертикальную ось, получим диаграмму Мора для реконструируемого напряженного состояния (рис. 7). Линия, параллельная линии минимальной прочности, проведенная в виде касательной к большому кругу Мора, дает положение предельного значения прочности, отвечающего образованию новых разрывов и трещин. Эта линия пересекает ось абсцисс в точке, отвечающей значению прочности сцепления горных пород  $\tau_f$  (рис. 7).

Таким образом, в результате на рис. 7 построена система больших и малых кругов Мора, характеризующая напряженное состояние исследуемой области. Здесь значение центра большого круга Мора при  $\mu_\sigma = 0$  определяется изотропным давлением  $\sigma_o = \sigma_2 = -p$ , а его радиус – значением максимального касательного напряжения  $\tau$ . Видно, что параметры  $p, \tau$  и  $\tau_f$  взаимно однозначно определены за счет углов  $\varphi_f$  и  $\Delta\alpha = (\bar{\alpha}_{\max} - \bar{\alpha}_{\min})$  (см. рис. 4, б).

Здесь надо отметить, что диаграмма Мора строится для эффективных нормальных напряжений, для которых учитывается уровень флюидного давления в трещинно-поровом пространстве пород, откуда следуют выражения для эффективных нормальных напряжений, эффективных главных напряжений и эффективного изотропного давления:

$$\begin{aligned} \sigma_{nn}^* &= \sigma_{nn} + p_f, \quad \sigma_i^* = \sigma_i + p_f \quad (i = 1, 2, 3), \\ p^* &= p - p_f. \end{aligned} \tag{6}$$

В монографии [Rebetsky, 2007] получены формулы для определения эффективного изотропного давления



**Рис. 7.** Диаграмма Мора регионального напряженного состояния для исследуемой совокупности АПС. См. подпись к рис. 5.  
**Fig. 7.** The Mohr diagram of the regional stress state for the ASS combination studied. See the caption for Fig. 5.

и максимального касательного напряжения. Их можно представить в виде:

$$\tau = \frac{\cos \varphi_f}{1 - \cos \Delta \alpha} \tau_f, p^* = \frac{\cos \Delta \alpha}{(1 - \cos \Delta \alpha) k_f} \tau_f \quad (7)$$

при  $\Delta \alpha = (\bar{\alpha}_{\max} - \bar{\alpha}_{\min}) / 2$ .

Используя значения углов, полученные ранее, находим:

$$\tau = 1.84 \tau_f, p^* = p - p_{fl}.$$

Представленные здесь процедуры графического анализа АПС на диаграмме Мора позволяют определять максимальные касательные напряжения и эффективное давление, нормированные на прочность сцепления. Эти процедуры можно именовать как второй этап СГ метода.

**Третий этап СГ метода.** Прочность сцепления  $\tau_f$ , на которую можно нормировать инварианты тензора напряжений (6), должна соответствовать масштабу усреднения напряжений (первые километры – десятки километров), поэтому получить такие данные из лабораторного эксперимента невозможно. Определение  $\tau_f$  является главной задачей третьего этапа СГ метода.

Для оценки истинных главных напряжений  $\sigma_i$  ( $i=1, 2, 3$ ) необходимо высказать определенные предположения относительно величины флюидного давления ( $p_{fl}$ ). Согласно работе [Kissin, 2009], в верхних горизонтах коры флюидное давление распределено по глубине по гидростатическому закону (вес столба жидкости на данной глубине  $z, \rho_{fl}=1 \text{ г/см}^3$  – плотность жидкости). Поскольку вертикальные напряжения, которые в случае напряженного состояния горизонтального сдвига отвечают промежуточному главному напряжению ( $\sigma_2$ ), допустимо положить равными весу столбца осадочных пород ( $\rho_c=2.7 \text{ г/см}^3$ ),

$$p_{fl} = \rho_{fl} g z, \sigma_2 = \sigma_{zz} = -p_{lt} = -\rho_c g z. \quad (8)$$

Используя (5) и (6), находим:

$$\sigma_2 = -p, \sigma_2^* = -p^*. \quad (9)$$

Из (8) и (9) следует, что в исследуемом регионе тектоническое давление зависит только от веса вышележащих пород  $p=p_{lt}$ . Это связано с реализуемым в коре геодинамическим типом напряженного состояния горизонтального сдвига. Эффективное значение тектонического давления соответственно определяется литостатикой и уровнем давления флюида  $p^* = p - p_{fl}$ .

Таким образом, выше выписаны все основные формулы, которые позволяют определять величины напряжений. Ключевым параметром, который покажет нам уровень тектонических напряжений, будет являться глубина их расчета. Если принять глубину расчета в 500 м – кровля фундамента, то для нее  $p=p_{lt}=135$  бар и  $\sigma_2=-135$  бар. Если флюидное давление с глубиной меняется по закону гидростатики, тогда  $p_{fl}=50$  бар ( $\lambda=p_{fl}/p_{lt}=0.37$ ) и, следовательно,  $\sigma_2^*=-85$  бар,  $p^*=85$  бар. Из второго выражения в (7) можно выразить прочность сцепления через эффективное изотропное давление:

$$\tau_f = \frac{(1 - \cos \Delta \alpha) k_f}{\cos \Delta \alpha} p^*. \quad (10)$$

Из этого выражения находим  $\tau_f = 41$  бар. Далее, используя первое выражение в (7), получим  $\tau = 75$  бар. Заметим, что рассчитанная прочность сцепления в несколько раз ниже, чем прочность образцов осадочных пород. Это различие вполне объяснимо масштабным фактором и влиянием природной трещиноватости.

Скважинные измерения [Zoback, 2007] и опыт бурения нефтяных скважин показывают, что начиная с глубины 200–300 м в осадочных бассейнах возможно появление слоев с аномально высоким флюидным давлением, близким к литостатике. Вполне нормальным является флюидное давление, превышающее гидростатическое на 40–50 %. Если принять, что  $p_{fl}=70$  бар ( $\lambda=0.52$ ), то получим  $p^*=65$  бар и отсюда, согласно выражениям (10) и (7), находим  $\tau_f=31.3$  бар и  $\tau=57.5$  бар.

Если еще более увеличить флюидное давление до значения  $\lambda=0.74$  ( $p_{fl}=100$  бар), т.е. вдвое выше значений,

соответствующих гидростатическому закону, то получим  $p^* = 35$  бар, откуда, согласно выражениям (10) и (7), находим  $\tau_f = 16.8$  бар и  $\tau = 31$  бар.

В исследуемом диапазоне флюидного давления  $p_f = 50-100$  бар величины главных напряжений, действующих в твердом каркасе пород осадочного чехла, будут иметь следующий диапазон значений:  $\sigma_1 = -60 \dots -104$  бар, а  $\sigma_3 = -210 \dots -166$  бар. При этом промежуточное главное напряжение постоянное  $\sigma_2 = -135$  бар. Выполненные оценки прочности сцепления, отвечающие предлагаемым вариантам значений флюидного давления, изменяются от 41 до 16.8 бар, что вполне вероятно для трещиноватых пород в региональном масштабе усреднения 30–50 км.

## 7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В теории анализа линеаментов из данных космоснимков высокого разрешения (аэрофотоснимков и топографических карт) СГ метод Сим позволяет определять положения скрытых осадочным чехлом активных разломов фундамента в регионах с режимом напряженного состояния в виде горизонтального сдвига. До сих пор результативной частью этого метода являлись азимуты простирания осей наибольшего и наименьшего сжатия, для которых принимались нулевые углы погружения.

В работе предложен алгоритм дополнительного анализа и расчета (второй и третий этапы СГ метода), в рамках которого можно оценить соотношение шаровой (эффективное изотропное давление) и девиаторной (максимальное касательное напряжение) компонент тензора напряжения и рассчитать величины напряжений в осадочном чехле на глубине кровли фундамента.

В этом расчете вначале (второй этап) строится редуцированная диаграмма Мора, на которую наносятся точками напряженные состояния (нормальные и касательные напряжения) для участков линеаментов, выделенных СГ методом в качестве зон локализации дизъюнктивно-пликативных деформаций. Анализ разброса этих точек вдоль дуги большого круга Мора определяет положение линии минимального сопротивления трения и дает возможность оценить величину коэффициента статического трения на разрывах. Для исследуемого в работе района  $k_f = 0.51$  пересечение этой линии с горизонтальной осью диаграммы Мора позволяет перейти от редуцированной к классической диаграмме Мора. Получены формулы, связывающие между собой характерные углы на диаграмме Мора и три главных физических параметра: максимальное касательное напряжение, эффективное изотропное давление и прочность сцепления породного массива. По этим формулам можно рассчитать отношение максимально касательного напряжения или эффективного давления к прочности сцепления.

На третьем этапе производится оценка прочности сцепления массива. Для этого необходимо все полученные на первых двух этапах расчета результаты перенести в глубину осадочного чехла и на скрытые

чехлом разломы фундамента. Кроме этого, необходимо иметь дополнительные данные (результаты скважинных наблюдений) или директивно задать флюидное давление, действующее в трещинно-поровом пространстве пород. Соответствующие формулы и технология расчета, представленные в статье, позволяют в этом случае рассчитать прочность сцепления, а также максимальное касательное напряжение и тектоническое давление.

Для исследуемого района вблизи г. Северска (Томская обл.) 18 линеаментов, выделенных из общей совокупности (134) основным алгоритмом СГ метода (первый этап метода), позволили рассчитать региональную ориентацию оси максимального сжатия (азимут простирания  $8^\circ$ ). Проведенный в рамках второго этапа анализ этих 18 линеаментов на диаграмме Мора показал, что они соответствуют квазиоднородному напряженному состоянию и поэтому на их основе возможно применение второго этапа СГ метода. Расчеты этого этапа позволили установить, что отношение максимального касательного напряжения к эффективному изотропному давлению в исследуемом регионе соответствует значению  $\tau/p^* = 0.885$ , что, в свою очередь, соответствует правой части диаграммы разрушения в законе Байерли [Byerlee, 1978].

Из четырех ранее выделенных разломов [Zubkov et al., 2005; Glinskiy et al., 2013] наиболее опасным является Городской. Наименее опасными являются разломы Наумовский, Кузовлевский.

## 8. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку публикации.

The authors contributed equally to this article.

## 9. КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ / CONFLICT OF INTERESTS

Авторы заявляют об отсутствии у них конфликта интересов. Все авторы прочитали рукопись и согласны с опубликованной версией.

The authors have no conflicts of interest to declare. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

## 10. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Angelier J., 1975. Sur L'analyse de Mesures Recueillies Dans des Sites Failles: L'utilite D'une Confrontation Entre les Methodes Dynamiques et Cinematiques. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences 281, 1805–1808.

Angelier J., 1989. From Orientation to Magnitude in Paleostress Determinations Using Fault Slip Data. Journal of Structural Geology 11 (1–2), 37–49. [https://doi.org/10.1016/0191-8141\(89\)90034-5](https://doi.org/10.1016/0191-8141(89)90034-5).

Arthaud F., 1969. Methode de Determination Graphique des Directions de Raccourcissement, D'allogement et Intermediare D'une Population de Failles. Bulletin de la Société Géologique de France S7-XI (5), 729–737. <https://doi.org/10.2113/gssgfbull.S7-XI.5.729>.

Brace W.F., 1978. Volume Changes during Fracture and Frictional Sliding: A Review. *Pure and Applied Geophysics* 116, 603–614. <https://doi.org/10.1007/BF00876527>.

Byerlee J.D., 1978. Friction of Rocks. *Pure and Applied Geophysics* 116, 615–626. [https://doi.org/10.1007/978-3-0348-7182-2\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-0348-7182-2_4).

Carey E., Bruneier B., 1974. Analyse Theorique et Numerique d'un Modele Mecanique Elementaire Applique a L'etude D'une Populaton de Failles. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences* 279, 891–894.

Gephart J.W., Forsyth D.W., 1984. An Improved Method for Determining the Regional Stress Tensor Using Earthquake Focal Mechanism Data: Application to the San Fernando Earthquake Sequence. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 89 (B11), 9305–9320. <https://doi.org/10.1029/JB089iB11p09305>.

Glinkiy M.L., Egorova V.A., Chertkov L.G., Zubkov A.A., Danilov V.V., Zavodiy T.Yu., Zakharova E.V., 2013. Monitoring of Underground Liquid Radioactive Waste Repository Produced by Siberian Chemical Plant. *Prospect and Protection of Mineral Resources* 10, 66–71 (in Russian) [Глинский М.Л., Егорова В.А., Чертков Л.Г., Зубков А.А., Данилов В.В., Заведий Т.Ю., Захарова Е.В. Мониторинг подземного хранилища жидких радиоактивных отходов Сибирского химического комбината // Разведка и охрана недр. 2013. № 10. С. 66–71].

Gogonenkov G.N., Kashik A.S., Timurziev A.I., 2007. Horizontal Displacements of West Siberia's Basement. *Russian Oil and Gas Geology* 3, 3–11 (in Russian) [Гогоненков Г.Н., Кашик А.С., Тимурзиев А.И. Горизонтальные сдвиги фундамента Западной Сибири // Геология нефти и газа. 2007. № 3. С. 3–11].

Gushchenko O.I., 1975. Kinematic Principle for Reconstructing Directions of Principal Stresses (from Geological and Seismological Data). *Doklady of the USSR Academy of Sciences* 225 (3), 557–560 (in Russian) [Гущенко О.И. Кинематический принцип реконструкции направлений главных напряжений (по геологическим и сейсмологическим данным) // Доклады АН СССР. 1975. Т. 225. № 3. С. 557–560].

Gzovsky M.V., 1975. *Fundamentals of Tectonophysics*. Nauka, Moscow, 536 p. (in Russian) [Гзовский М.В. Основы тектонофизики. М.: Наука, 1975. 536 с.].

Kissin I.G., 2009. *Fluids in the Earth's Crust: Geophysical and Tectonical Aspects*. Nauka, Moscow, 329 p. (in Russian) [Киссин И.Г. Флюиды в земной коре: геофизический и тектонический аспекты. М.: Наука, 2009. 329 с.].

Kozhurin A.I., 2013. *Active Geodynamics of the Northwestern Sector of the Pacific Tectonic Belt (According to the Data of the Study of Active Faults)*. PhD Thesis (Doctor of Geology and Mineralogy). Moscow, 131 p. (in Russian) [Кожурин А.И. Активная геодинамика северо-западного сектора Тихоокеанского тектонического пояса (по данным изучения активных разломов): Дис. ... докт. геол.-мин. наук. М., 2013. 131 с.].

Lisle R., 1987. Principal Stress Orientation from Faults: An Additional Constrains. *Annales Tectonicae* 1 (2), 155–158.

Marrett R., Allmendinger R.W., 1990. Kinematic Analysis of Fault Slip Data. *Journal of Structural Geology* 12 (8), 973–986. [https://doi.org/10.1016/0191-8141\(90\)90093-E](https://doi.org/10.1016/0191-8141(90)90093-E).

Michael A.J., 1984. Determination of Stress from Slip Data: Faults and Folds. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 89 (B13), 11517–11526. <https://doi.org/10.1029/JB089iB13p11517>.

Michael A.J., 1987a. Stress Rotation during the Coalinga Aftershock Sequence. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 92 (B8), 7963–7979. <https://doi.org/10.1029/JB092iB08p07963>.

Michael A.J., 1987b. The Use of Focal Mechanisms to Determine Stress: A Control Study. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 92 (1), 357–368. <https://doi.org/10.1029/JB092iB01p00357>.

Mikhailova A.V., 2007. Geodynamic Characteristics of Structures Formed in the Layer above Active Faults in the Basement. In: *Geophysics of the XXI Century: The Year of 2006. Proceedings of the Eighth Geophysical Readings Named after V.V. Fedynsky (March 02–04, 2006)*. GERS, Tver, p. 111–118 (in Russian) [Михайлова А.В. Геодинамические характеристики структур, образовавшихся в слое над активными разломами фундамента // Геофизика XXI столетия: 2006 год. Сборник трудов Восьмых геофизических чтений им. В.В. Федынского (2–4 марта, 2006 г.). Тверь: ГЕРС, 2007. С. 111–118].

Neotectonic Map of Northern Eurasia, 1997. 1:5000000 Scale. Joint Institute of Physics of the Earth RAS, Moscow (in Russian) [Карта новейшей тектоники Северной Евразии. Масштаб 1:5000000. М.: ОИФЗ РАН, 1997].

Rebetsky Yu.L., 1987. The Stress State of a Layer during a Longitudinal Horizontal Shift of Its Foundation Blocks. In: Yu.D. Boulanger (Ed.), *Fields of Stress and Deformation in the Earth's Crust*. Nauka, Moscow, p. 41–57 (in Russian) [Ребецкий Ю.Л. Напряженное состояние слоя при продольном горизонтальном сдвиге блоков его фундамента // Поля напряжений и деформаций в земной коре / Ред. Ю.Д. Буланже. М.: Наука, 1987. С. 41–57].

Rebetsky Yu.L., 1988. Stress State of the Layer with Longitudinal Shear. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 24 (9), 698–703.

Rebetsky Yu.L., 1997. Reconstruction of Tectonic Stresses and Seismotectonic Strain: Methodical Fundamentals, Current Stress Field of Southeastern Asia and Oceania. *Doklady of the Russian Academy of Science* 354 (4), 560–563.

Rebetsky Yu.L., 1999. Methods for Reconstructing Tectonic Stresses and Seismotectonic Deformations Based on the Modern Theory of Plasticity. *Doklady Earth Sciences* 365 (3), 370–373.

Rebetsky Yu.L., 2007. *Tectonic Stresses and Strength of Mountain Ranges*. Nauka, Moscow, 406 p. (in Russian) [Ребецкий Ю.Л. Тектонические напряжения и прочность горных массивов. М.: Наука, 2007. 406 с.].

Rebetsky Yu.L., Mikhailova A.V., 2011. The Role of Gravity in Formation of Deep Structure of Shear Zones. *Geodynamics & Tectonophysics* 2 (1), 45–67 (in Russian) [Ребецкий Ю.Л., Михайлова А.В. Роль сил гравитации в формировании структур разрушения в глубине зон сдвига //

Геодинамика и тектонофизика. 2011. Т. 2. № 1. С. 46–67]. <https://doi.org/10.5800/GT-2011-2-1-0033>.

Rebetsky Yu.L., Mikhailova A.V., 2014. Deep Heterogeneity of the Stress State in the Horizontal Shear Zones. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 50, 824–838. <https://doi.org/10.1134/S1069351314060068>.

Rebetsky Yu.L., Mikhailova A.V., Rosanova G.V., Fursova E.V., 1997. II. Stress-Monitoring: The Modern Field of Regional Stresses in South-East Asia and Oceania. *Principles of Quasiplastic Deforming of Fractured Media. Journal of Earthquake Prediction Research* 6 (1), 11–36.

Reches Z., 1978. Analysis of Faulting in Three-Dimensional Strain Field. *Tectonophysics* 47 (1–2), 109–129.

Reches Z., 1983. Faulting of Rock in Three-Dimensional Strain Fields II. Theoretical Analysis. *Tectonophysics* 95 (1–2), 133–156. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(83\)90264-0](https://doi.org/10.1016/0040-1951(83)90264-0).

Sherman S.I., Bornyakov S.A., Buddo V.Yu., 1983. Areas of Dynamic Influence of Faults (Modelling Results). *Nauka, Novosibirsk*, 112 p. (in Russian) [Шерман С.И., Борняков С.А., Буддо В.Ю. Области динамического влияния разломов (результаты моделирования). Новосибирск: Наука, 1983. 112 с.].

Sim L.A., 1991. The Study of Tectonic Stresses by Geological Indicators (Methods, Results, Recommendations). *Proceedings of Higher Educational Establishments. Geology and Exploration* 10, 3–22 (in Russian) [Сим Л.А. Изучение тектонических напряжений по геологическим индикаторам (методы, результаты, рекомендации) // Известия вузов. Геология и разведка. 1991. № 10. С. 3–22].

Sim L.A., 2000. The Influence of Global Tectogenesis on the Latest Tense State of the Platforms of Europe. In: Yu.G. Leonov (Ed.), M.V. Gzovsky and the Development of Tectonophysics. *Nauka, Moscow*, p. 326–350 (in Russian) [Сим Л.А. Влияние глобального тектогенеза на новейшее напряженное состояние платформ Европы // М.В. Гзовский и развитие тектонофизики / Ред. Ю.Г. Леонов. М.: Наука, 2000. С. 326–350].

Sim L.A., Bryantseva G.V., 2007. The Latest Tectonics and Neotectonic Stresses of the North of the West Siberian Plate. *Bulletin of Moscow Society of Naturalists. Geological Section* 82 (6), 3–10 (in Russian) [Сим Л.А., Брянцева Г.В. Новейшая тектоника и неотектонические напряжения севера Западно-Сибирской плиты // Бюллетень МОИП. Отдел Геологический. 2007. Т. 82. № 6. С. 3–10].

Stefanov Yu.P., Bakeev R.A., Rebetsky Yu.L., Kontorovich V.A., 2014. Structure and Formation Stages of a Fault Zone in a Geomedium Layer in Strike-Slip Displacement

of the Basement. *Physical Mesomechanics* 17, 204–215. <https://doi.org/10.1134/S1029959914030059>.

Trifonov V.G., Kozhurin A.I., Lukina N.V., 1993. Study and Mapping of Active Faults. In: *Seismicity and Seismic Zoning of North Eurasia. Vol. 1. P. 196–206* (in Russian) [Трифонов В.Г., Кожурин А.И., Лукина Н.В. Изучение и картирование активных разломов // Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии. 1993. Вып. 1. С. 196–206].

Yunga S.L., 1979. On the Mechanism of Deformation of a Seismically Active Volume of the Crust. *Bulletin of the USSR Academy of Sciences. Physics of the Earth* 10, 14–23 (in Russian) [Юнга С.Л. О механизме деформирования сейсмоактивного объема земной коры // Известия АН СССР. Физика Земли. 1979. № 10. С. 14–23].

Zhalkovsky N.D., Kuchai O.A., Muchnaya V.I., 1995. Seismicity and Some Characteristics of the Stress State of the Earth's Crust of the Altai-Sayan Region. *Russian Geology and Geophysics* 10 (36), 20–30 (in Russian) [Жалковский Н.Д., Кучай О.А., Мучная В.И. Сейсмичность и некоторые характеристики напряженного состояния земной коры Алтае-Саянской области // Геология и геофизика. 1995. Т. 10. № 36. С. 20–30].

Zhalkovsky N.D., Muchnaya V.I., 1975. Some Results of Macroseismic Studies of Strong Earthquakes in the Altai-Sayan Region. In: V.N. Gaisky (Ed.), *Seismicity of the Altai-Sayan Region. Collection of Scientific Papers. Institute of Geology and Geophysics of the USSR Academy of Sciences, Novosibirsk*, p. 5–15 (in Russian) [Жалковский Н.Д., Мучная В.И. Некоторые результаты макросейсмических исследований сильных землетрясений Алтае-Саянской области // Сейсмичность Алтае-Саянской области: Сборник научных трудов / Ред. В.Н. Гайский. Новосибирск: Изд-во ИГиГ АН СССР. 1975. С. 5–15].

Zoback M.D., 2007. *Reservoir Geomechanics. Cambridge University Press*, 505 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511586477>.

Zubkov A.A., Lukin A.A., Gusev E.V., Chernyaev E.V., 2005. History of Engineering and Geological Provision of the Polygon for Underground Disposal of Liquid Radioactive Wastes of the Siberian Chemical Plant. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University* 308 (2), 194–200 (in Russian) [Зубков А.А., Лукин А.А., Гусев Е.В., Черняев Е.В. История инженерно-геологического обеспечения полигонов захоронения жидких радиоактивных отходов Сибирского химического комбината // Известия Томского политехнического университета. 2005. Т. 308. № 2. С. 194–200].