РАЗЛОМЫ ОСАДОЧНОГО ЧЕХЛА ПЛАТФОРМ И МЕТОДЫ ИХ ИССЛЕДОВАНИЯ

Л.А. Сим, А.В. Михайлова

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН

Изучение разломов осадочного чехла платформ традиционными геологическими методами вызывает объективные трудности, связанные со слабой деформированностью субгоризонтальных отложений чехла, а также повсеместно развитыдневной поверхности плохо сцементированными или рыхлыми кайнозойскими отложениями. Особенно сложно картировать и выделять новейшие и современные активные разломы, изучение которых имеет важное прикладное значение в связи с проектированием крупных инженерных сооружений (АЭС, водомосты), оценкой хранилища, влияния геологической среды на сохранность железных дорог, газопроводов и т.д.

Разломы осадочного чехла часто ассоциируются с линеаментами, зонами повышенной трещиноватости на поверхности, которые коррелируются разломами фундамента. Доказательства тектонической природы таких линеаментов практически отсутствуют и в течемногих лет ведутся дискуссии возможности проявления актив-ности разломов фундамента на поверхности. Существует мнение, что «при достаточно большой мощности покрова малоамплитудные смещения фундамента в отложениях покрова угасают и в приповерхностной зоне практически не проявляются» [Макаров, 2007, с. 308]. В рыхлых кайнозойских отложениях, перекрыва-ющих почти сплошным чехлом плиты, зоны разломов разрабатываются современными водотоками с прямолинейными руслами или долинами. Иногда заметное различие абсолют-ных отметок рельефа в разных крыльях таких линеаментов может служить признаком вертикальной составляющей новейших переме-щений. Для уверенного выявления тектони-ческой природы «разломов» в соответствии с перечисленными признаками необходимо применение комплекса полевых и камеральных методов.

При полевых исследованиях линеаментов можно не только подтвердить, что последние имеют разломную природу, но в некоторых случаях и установить ориентацию плоскости сместителя с линией перемещения по ней. Для этого производится массовое измерение трещиноватости вблизи линеамента и используется

метод поясов трещиноватости [Данилович, 1961]. Необходимо отметить, что наиболее уверезультаты получаются, когда трещиноватость измеряется раздельно в 2-х группах точек, расположенных в разных крыльях предполагаемого разлома. На плитах платформ чаще всего обнажения приурочены к берегам рек. В зависимости от ориентировки обнажения, а иногда и литологических характеристик исслепород, представительность систем трещин различная, что сглаживается при их замерах в нескольких точках, а сходство результатов выделения поясов трещиноватости, измеренной в разных крыльях линеамента увеличивает достоверность выводов.

На рис. 1 (А, В) приведены примеры стереограмм с поясами трещиноватости, измеренной в породах Мезенской синеклизы: в верхнепермских аргиллитах и алевролитах (А) и в четвертичных отложениях (моренные суглинки, В). Если простирание разлома МN известно по геофизическим данным (положение разлома фундамента) и (или) по данным дешифрирования, то пояс РР1 с точкой В (полюс пояса) дает возможность определения плоскости сместителя путем соединения точек М, В, N единой дугой большого круга с полюсом в т. R (рис. 1, А и В). Точка К – пересечение найденной плоскости разлома с поясом трещиноватости, соединенная с центром стереограммы согласно методике выявления поясов трещиноватости, образует линию перемещения по найденной плоскости разлома (линия КО). При этом перемещении сформировался анализируемый пояс трещиноватости. По трещиноватости в верхнепермских отложенивозможен вариант проведения трещиноватости MBN с полюсом в точке R, тогда плоскость разлома определяется как дуга большого круга с точками MRN, что дает субгоризонтальную поверхность, противоречащую прямолинейному простиранию разлома фундамента. При таком варианте пояса трещинноватости тип перемещения будет близок к чистому сдвигу.

Для определения направления перемещения по рассчитанной линии необходимо привлечение дополнительных данных; например, если СЗ крыло разлома (рис. 1, A) поднято, то разлом яв-

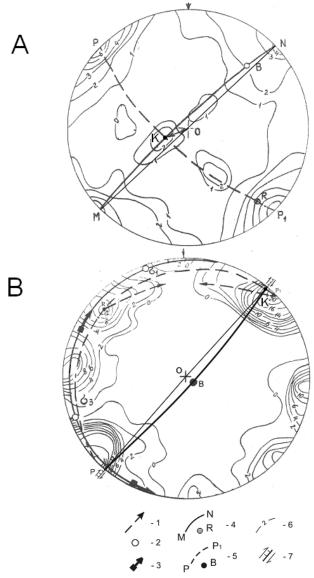


Рис. 1. Выделение поясов трещиноватости и реконструкция тектонических напряжений. 1 — Направление разброса трещин одной системы; 2 — выход на верхнюю полусферу осей сжатия (σ₃) и растяжения (σ₁); 3 — полюс плоскости действия максимальных касательных напряжений и вектор перемещения по ней; 4 — полюс (R) и плоскость разлома (MN); 5 — полюс (B) и пояс трещиноватости (PP1); 6 — изолинии плотностей полюсов трещин; 7 — простирание плоскости разлома и кинематический тип (правый сбросо-сдвиг)

ляется левым сбросо-сдвигом.

При изучении разломов, в частности, на платформах, крайне важна реконструкция тектонических напряжений. В зависимости геологического строения района (обнаженность, степень литифицированности горных пород, доступных исследователю и т.д.) и решаемых задач применяются различные методы восстановления осей главных нормальных напряжений: кинематический, разработанный О.И. Гущенко [1979] и статистический П.Н. Николаева [1992]. Оба метода имеют свои достоинства и ограничения. Первый, основанный на анализе векторов тектонических перемещений (на зеркалах скольжения), дает возможность тонкого анализа полей напряжений, но распространение зеркал скольжения на платформах носит спорадический характер. Второй метод использует массовые замеры трещиноватости с последующим статистическим анализом; ограничение применения метода связано с повсеместным распространением ротационной трещиноватости, которая затушевывает тектонические трещины.

По трещиноватости, измеренной в морене московского оледенения, удалось реконструировать новейшее поле напряжений, подтвердить новейшую активизацию разломов и установить кинематический тип перемещений по ним. На рис. 1, В тип перемещения — сдвиговый (линия КО) с минимальной вертикальной компонентой; по ориентации осей сжатия и растяжения, которые восстановленны статистическим методом, сдвиг является правым. Так как параметры разломов устанавливались по трещиноватости в

четвертичных отложениях, то можно говорить и о современной активности разломов, которая влияет на сохранность ловушек нефти и газа и условия их разработки, на устойчивость гражданских сооружений. Доминирующим кинематическим типом разломов Мезенской синеклизы оказался сдвиговый; возраст перемещений определен как современный и новейший по возрасту моренных суглинков, в которых производилось измерение трещиноватости, а также по сходству ориентировки осей главных нормальных напряжений, восстановленных по бороздам скольжения в палеозойских породах и по трещиноватости в четвертичных отложениях. Такой же тип неотектонических перемещений характерен и для разломов Балтийского щита [Сим, 2000].

Так как многолетнее исследование разломов платформ показало, что большинство из них является сдвигами, то для их распознавания и реконструкции тектонических напряжений, вызывающих сдвиговые перемещения, был разработан структурно-геоморфологический (СГ) метод реконструкции неотектонических напряжений [Сим, 1991, Sim et al., 1996].

Технология метода предусматривает анализ ориентировки мелких линеаментов, сформированных на дневной поверхности при возможных перемещениях по разломам фундамента. Они идентифицируются с оперяющими разрывами сдвигов, закономерно ориентированными относительно плоскости основного разлома. Эти закономерности известны по данным полевого изучения и моделирования сдвигов [Гзовский, 1975; Шерман и др., 1991].

Если взаимная ориентировка мегатрещин и линеамента соответствуют одному из вариантов ориентации оперяющих трещин в зоне сдвига, приведенных в работе М.В. Гзовского [Гзовский, 1975], то можно утверждать, что линеамент и мегатрещины имеют разломную природу; это позволяет: восстановить ориентации осей сжатия и растяжения в горизонтальной плоскости, определить знак сдвигового перемещения (правый или левый) по разлому, установить геодинамическую обстановку (сжатия или растяжения) формирования сдвига в осадочном чехле над активизированным разломом фундамента, относящимся по кинематическому типу к сдвигам. Возраст поля напряжений определяется по возрасту отложений, нарушенных оперяющими разрывами. Подтверждением распространенности сдвигов на платформенных плитах служит обнаружение сдвигов по данным сейсмики 3Д на месторождениях углеводородов в Западной Сибири [Гогоненков и др., 2007].

Характер связи тектонических активных разломов фундамента с поверхностными структурами и мегатрещинами в зонах сдвигов в осадочном чехле платформ был описан с помощью математического и физического моделирования (рис. 2) [Ребецкий, 1987; Сим и др., 2007]. Математические расчёты показали, что над сдвигом в фундаменте в осадочной толще возникают два максимума эквивалентных (ответственных за разрушение) напряжений (рис. 2, а).

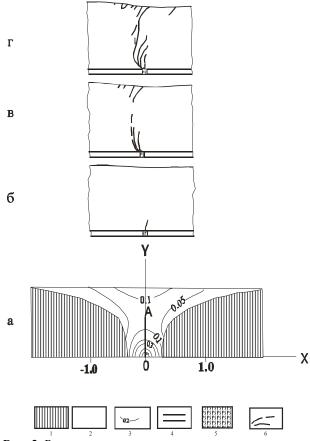


Рис. 2. Разрушение слоя над сдвигом в его основании. а - расчетные эквивалентные напряжения, ответственные [Ребецкий, за разрушение 19871. Последовательные стадии развития разрывов [Михайлова, 2007]: б - зарождение разрыва в слое над областью сдвигания в основании, в - развитие разрывов двумя группами - снизу и сверху, г - объединение обеих групп разрывов. 1 - область двустороннего сжатия, область отсутствия разрывов; 2 – область скалывания: максимальные нормальные напряжения положительны, минимальные – отрицательны; 3 – изолинии эквивалентных напряжений; 4 – блоки фундамента в основании; 5 – зона дробления; 6 – разрывы (в разрезе)

Основной максимум приурочен к основанию чехла над разломом фундамента, а второй — к дневной поверхности. Характер и последовательность разрушения определились с помощью физического эксперимента. Разрушение в деформируемом слое начинается в его основании непосредственно над разломом фундамента в области больших значений напряжений (рис. 2, б). Далее в обеих областях повышенных

эквивалентных напряжений, в подошве и кровле осадочного чехла, образуются две самостоятельные группы разрывов (рис. 2, в), которые на завершающей стадии объединяются и формируют магистральный разлом (рис. 2, г).

Приповерхностный максимум оперяющих разрывов, по-видимому, представлен на фотосимках и топографических картах хорошо дешифрируемыми мегатрещинами — мелкими прямолинейными элементами рельефа, которые и образуют зону повышенной трещиноватости. Такие зоны повышенной трещиноватости — показатели активизированного разлома фунда-мента — возникают на дневной поверхности, согласно данным моделирования, даже на ранних стадиях развития разлома до формирования единой магистральной плоскости разрыва в осадочном чехле.

Следует отметить, что проявление движений по разломам видно на поверхности с ранних стадий развития всех типов разлома, хотя его характер различен при разных механизмах деформирования, то есть при движениях блоков фундамента по разломам разного типа. При вертикальных сместителях (сдвиг, сброс/взброс) разрывные нарушения, возникающие в деформируемом слое, образуют узкую область, середина

которой довольно точно проецируется на выход разлома в основании слоя. При наклонном сбросе по мере продвижения блока область разрушения распространяется от опущенного блока к приподнятому, а при наклонном взбросе концентратором напряжений является передовая часть поднимающегося блока. При раздвиге возникают две расходящиеся области разрушения, они расходятся от основания слоя, в месте выхода разлома фундамента, к поверхности (рис. 3).

Во второй половине прошлого века по инициативе В.А. Сидорова и А.Т. Донабедова были организованы геофизические наблюдения за поведением тектонических разломов фундамента с целью выявления вторичных нефтяных залежей. В том числе был создан полигон в районе Припятской впадины, где проводились гравиметрическая и геодезическая съёмки. На рисунке 4 приведены некоторые результаты этих наблюде-[Кузьмин, 1989]: рис. 4-І – кривые современных вертикальных движений земной поверхности по результатам трёхкратного нивелирования за период с 1979 по 1983 годы. В нижней части рисунка показано положение разломов фундамента, над которыми проводилась нивелировка дневной поверхности.

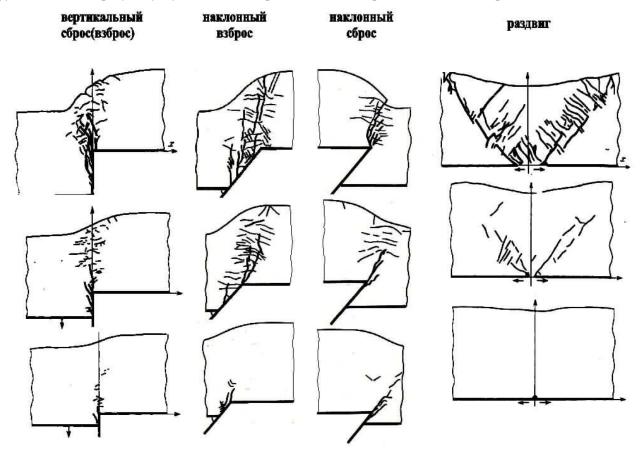


Рис. 3. Разрушение слоя над движущимися разломами фундамента (по данным моделирования на эквивалентных материалах).

Из графика видно, что в разные периоды времени происходила активизация движений по разным разломам, но каждый раз подвижки отдвижениях ражались в поверхности. рисунке 4-ІІ даётся пример современных движений для крупно (а) и малоамплитудного (б) разломов [Кузьмин, 2006]. Здесь на графике показаны приращения вертикальных переме-щений за некоторый интервал времени между нивелировками. Для доказательства глубинности происхождения аномалий на данном рисунке представлены результаты повторных гравиметнаблюдений. Пространствен-ное рических положение экстремальных значений параметров на кривых, построенных по результатам обеих съёмок, совпадает, что указывает на их общий, глубинный источник.

Эти данные показывают также, что любое незначительное движение блоков фундамента отражается на поверхности. Следовательно, можно утверждать, что геоморфологические элементы поверхности, используемые одним из

авторов при восстановлении тектонических напряжений действительно отражают глубинную тектоническую обстановку. Практические успехи автора метода [Сим, 1991, 2000] при прогнозе различных тектонических ситуаций, успешное прогнозирование залежей нефти авторов цитируемых здесь работ [Донабедов и др., 1981; Касьянова и др., 1996], также являются дополнительным доказа-тельством правильности посылок автора, положенных в основу его метода. Существует также представление, что к разломам приурочены «суперинтенсивные деформации» дневной поверхности. асейсмичных платформенных разломов из-за отсутствия диссипирующего сейсмического фактора эти деформации выше по сравнению с сейсмоактивными, в которых происходит «переток» части общего энергетического эквивалента в форме сейсмичности [Кузьмин, 1989, 2006].

О современных движениях по разломам на платформенных плитах свидетельствуют также измерения перемещений при прорыве газопрово-

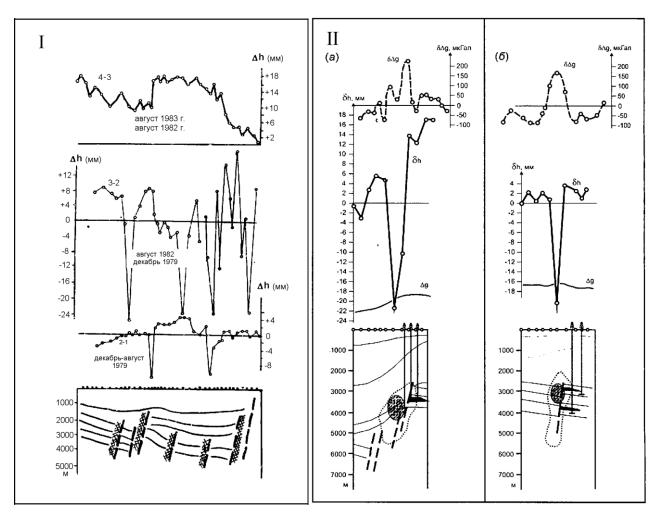


Рис. 4. Кривые современных вертикальных движений земной поверхности: I - по результатам трёхкратного нивелирования за период с 1979 по 1983 годы, II - для крупно- (*a*) и малоамплитудного разломов (δ).

да под Сургутом (вертикальная амплитуда 108 мм, горизонтальная — 47 мм) и аварии на канализационном коллекторе (92 мм вертикальная амплитуда, горизонтальная — 57 мм) [Леонтьев, 2005].

Кинематика дневной поверхности над активными разломами фундамента изучалась также на моделях из эквивалентных материалов и с помощью теоретических расчётов, проводившихся в рамках механики сплошной среды в упругой постановке (рис. 5). На основании этих данных были получены графики градиентов перемещений поверхности (верхний ряд рисунка) над областями разрушения в деформируемом слое (нижний ряд рисунка) для трёх типов разрушения: при вертикальном сбросе, при движении блока вверх по наклонным разломам с образованием двух зон разрушения — сбросовой и взбросовой, а также при раздвигании блоков основания.

Из рисунка следует, что экстремальные значения градиентов приурочены к выходам разломов под подошву деформируемого слоя.

Наиболее чётко это проявляется в областях над вертикальными разломами — сброс/взброс (левая часть рисунка) и сдвигами по вертикальным разломам (см. рис. 2). Над наклонными разломами максимумы градиентов несколько сдвинуты (средняя часть рисунка): при взбросе — незначительно в сторону надвигания, при сбросе — также в сторону приподнятой части подошвы. При раздвиге образуется две расходящиеся области разрушения и максимумы кривых градиента скоростей вертикальных перемещений располагаются над ними.

Приведённые данные о перемещениях поверхности над движущимися по разломам блоками фундамента, полученные из теоретических расчётов, эквивалентного моделирования, а также по результатам многолетних наблюдений за современными вертикальными движениями поверхности при помощи геодезических съёмок, указывают на обязательное наличие связи между глубинными тектоническими движениями этого рода и перемещениями дневной поверхности, которые вызывают образование как пликатив-

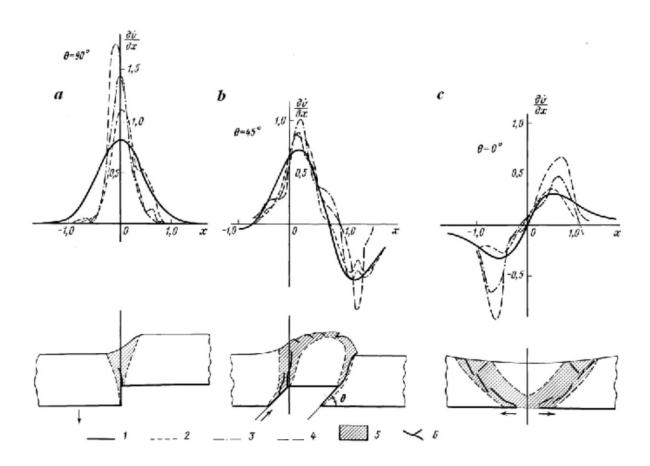


Рис. 5. 1.Соотношение градиентов скоростей вертикальных перемещений поверхности с областями разрушения в слое над активными разломами (движущимися блоками) фундамента. Графики градиентов скоростей перемещений поверхности, полученные: 1 – из теоретических расчётов на момент начала движения блоков; 2, 3, 4 – на основании экспериментальных данных по результатам моделирования на эквивалентных материалах для последовательных стадий опыта; 5 – границы области разрушения; 6 – крупные разрывы в деформируемом слое

ных,так и разрывных поверхностных структур (линеаментов и зон повышенной трещиноватости). При этом данные о перемещениях поверхности могут служить прогностическим признаком присутст-вия разрывов даже на самой ранней стадии движения блокафундамента, а при наличии некоторых дополнительных сведений и признаком разрушения определённого типа. Во

всяком случае приведённые результаты доказывают неоспоримо тот факт, что глубинные разломы, если по ним происходят подвижки, проявляются на дневной поверхности даже на самой ранней стадии движения, а также то, что если сместитель разлома вертикален, то по этим данным можно определить его положение с хорошей степенью точности.

выводы

Приведенные в работе примеры изучения разломов осадочного чехла платформ полевыми тектонофизическими, геофизическими, геодезическими методами, а также теоретическими, экспериментальными методами и дешифрированием разного рода фотоснимков и топографических карт свидетельствуют о возможностях

определения разломной природы отдельных линеаментов, о характере проявления перемещений по разломам фундамента на дневной поверхности, а также о возможностях определения кинематического типа разломов, которые практически не удается установить прямыми геологическими методами.

ЛИТЕРАТУРА

- *Гзовский М.В.* Основы тектонофизики. М.: Наука. 1975. 535 с.
- Гогоненков Г.Н., Кашик А.С., Тимурзиев А.И. Горизонтальные сдвиги фундамента Западной Сибири // Геология нефти и газа. № 3. 2007.
- Григорьев А.С., Михайлова А.В., Шахмурадова З.Е. Зависимость между характеристиками вертикальных перемещений поверхности и напряжённым состоянием осадочного чехла в надразломных зонах // Поля напряжений и деформаций в литосфере. М.: Наука. 1979. С. 97–125.
- Гущенко О.И. Метод кинематического анализа структур разрушения при реконструкции полей тектонических напряжений // Поля напряжений и деформаций в литосфере. М.: Наука. 1979. С. 7–25.
- Данилович В.Н. Метод поясов при исследовании трещиноватости, связанной с разрывными смещениями Иркутск: изд. ИПИ. 1961. 47 с.
- Донабедов А.Т., Сидоров В.А., Григорьев А.С. и др. Связь между современными смещениями земной поверхности и напряженным состоянием осадочного чехла в надраз-ломных зонах // Математическое моделиро-вание в геофизических исследованиях на нефть и газ. М.: Наука. 1982.
- Касьянова Н.А., Кузьмин Ю.О. Современная аномальная геодинамика недр и ее влияние на объекты нефтегазового комплекса. М.: Геоинформмарк. 1996. 56 с.
- Кузьмин Ю.О. Современная геодинамика разломных зон осадочных бассейнов и процессы подготовки землетрясений // Про-

- гноз землятресений № 11 Геодезические методы исследований. Душанбе–Москва: «Дониш». 1989. С. 52–60.
- Кузьмин Ю.О. Современная динамика разломов: активность или опасность? // Активные геологические и геофизические процессы в литосфере. Методы, средства и результаты изучения. Материалы XII международной конференции. Воронеж: Изд. ИПЦ ВГУ. 2006. С. 275–278.
- Пеонтьев А.В. Некоторые особенности геодинамики массива горных пород в уралосибирских регионах // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли. Тр. Научной конференции. Новосибирск: 2005. С. 203–218.
- Макаров В.И. Активные разломы платформ: представления, реальность, проблемы // Активные геологические и геофизические процессы в литосфере. Методы, средства и результаты изучения. Материалы XII международной конференции. Воронеж: Изд. ИПЦ ВГУ. 2006. С. 306 311.
- Николаев П.Н. Методика тектоно-динамического анализа. М.: Недра. 1992. С. 129–141.
- Ребецкий Ю.Л. Напряженное состояние слоя при продольном горизонтальном сдвиге блоков его фундамента // Поля напряжений и деформаций в земной коре. М.: Наука. 1987. С. 41–56.
- Сидоров В.А., Кузьмин Ю.О. Пространственновременные характеристики современной геодинамики геофизической среды сейсмо-активных и асейсмичных областей // Сб. Дискретные свойства геофизической среды. М.: Наука. 1989. С. 18–33.

- Сим Л.А. Изучение тектонических напряжений по геологическим индикаторам (методы, результаты, рекомендации). Изв. вузов. геол. и разв. 1991. № 10. С. 3–22.
- Сим Л.А., Михайлова А.В., Войтенко В.Н. Сдвиговая тектоника платформ (по данным моделирования и реконструкции неотектонических напряжений) // Проблемы современной сейсмологии и геодинамики Центральной и Восточной Азии. Мат-лы всерос совещания с международным учас-тием, Иркутск 18-24 сент. 2007 г. Т. 2, Иркутск: Издво ИЗК СО РАН. 2007. С. 147–151.
- Сим Л.А. Влияние глобального тектогенеза на новейшее напряженное состояние платформ Европы // В сб. М.В. Гзовский и развитие тектонофизики. М.: Наука. 2000. С. 326–350.
- Сим Л.А., Брянцева Г.В., Чекмарев К.В. Влияние глобальных тектонических процессов на

- формирование новейших структур севера Западно-Сибирской плиты и Полярного Урала // Докл. VIII Междунар. Конф. «Новые идеи в науках о Земле». Т. 1. М., РГГРУ. 10-13 апреля 2007. С. 341–344.
- Шерман С.И., Семинский К.Ж., Борняков С.А. и др. Разломобразование в литосфере. Зоны сдвига. Новосибирск: Наука СО. 1991. 262 с.
- Grigoryev A.S., Volovich I.M., Mikhailova A.V., Rebetsky Yu.L. and Shakhmuradova Z.E. Relationships between the kinematics of the top of a layer and the state of stress within it due to block motion at its bottom // Journal of Geodinamics. 1988, 10. P. 127–138.
- Sim L., Sergeev A.A. Eine strukturell-geomorphologische Methode zur Analyse aktiver.Bruche mit dem Ziel der bestimmung neotectonischer Spannungen in Tafelgebieten // Ztschr. Geol. Wiss. 1996. N 20. S. 369–375.