

Дискуссии

ОБРАТНЫЕ ЗАДАЧИ ГЕОДИНАМИКИ И РОЛЬ РОТАЦИОННЫХ ИНЕРЦИОННЫХ СИЛ (Ответ на работу А.В. Викулина «Проблема ротационных движений в геологии»)

Неожиданно мы оказались вовлечены в дискуссию с А.В. Викулиным (2016) в достаточно далеко продвинутой области геодинамики — математическом моделировании напряжений и деформаций, формирующихся в коре регионов с различной геодинамической обстановкой. Работы в рамках этой темы известны с середины прошлого века и направлены на выяснение причин формирования деформаций в геологических объектах. Для этого направления нельзя говорить, что используемые «понятия и представления в настоящее время находятся в стадии обсуждения и формирования» (Викулин, 2016, стр. 101). Вероятно, было бы правильнее сказать, что в этой области идет уточнение деталей для уже общепринятых и поиск пропущенных или недооцененных факторов воздействия.

В работе А.В. Викулина есть два основных положения: 1) «несостоятельность общепринятой в тектонике плит схемы построения механической задачи, в основе которой в качестве основополагающей заложена концепция силы» (Викулин, 2016, стр. 101); 2) «важность учета ротационного фактора при изучении движений и геологической, и геофизической сред», (Викулин, 2016, стр. 103). При этом говорится о необходимости «замены основополагающей в геодинамике (тектонофизике) концепции «сила» на концепцию «движение» (Викулин, 2016, стр. 102), то есть предлагается отказаться от анализа действующих сил и, как следствие, напряжений, а сосредоточиться на изучении перемещений. Однако буквально в следующем абзаце находим: «Вследствие поступательного движения верхней мантии вдоль поверхности Земли происходит изменение направления момента, что в соответствии с законом его сохранения приводит к появлению момента силы, прикладываемого к поверхности блока со стороны окружающей его среды» (Викулин, 2016, стр. 103). Из приведенной фразы следует, что без сил все же обойтись нельзя, так как надо хотя бы обосновать, почему происходит исследуемое движение.

В указанном в цитате *механизме деформирования* блока земной коры и окружающей его области первичными (активными) силами являются внутренние инерционные силы, а вторичными (реактивными) граничные силы, действующие со стороны окружающей среды. Заметим, что если не понимать разницы между активными и реактивными силами, то можно выполнить неправильную интерпретацию геодинамического явления (вращение возможно также за счет боковых сил — напряжений, возникающих в блочной среде). В региональных исследованиях, опираясь только на кинематику, различить активные и реактивные силы невозможно. Именно поэтому в наиболее актуальных исследованиях (Саньков и др., 2011) производится переход от поля перемещений (скоростей) к градиентам перемещений, которые являются мостиком к напряжениям. Отметим, что термин *механизм деформирования* геологического объекта, использованный в этом абзаце, определяет систему нагружения, отвечающую закономерности распределения исследуемой в геосреде непрерывной и разрывной деформации.

В ответе на замечания в рецензии А.В. Викулина мы писали, что в наших исследованиях мы понимаем неоднозначность (некорректность) решения обратной задачи геодинамики по установлению механизма деформирования локального участка коры (Ребецкий, 2015). Поэтому развиваемая нами концепция определения такого механизма опирается на два типа данных: 1) геометрию основных деформированных границ литосферы; 2) характерные особенности напряженного состояния коры, определенные тектонофизическими методами. Применительно к внутриконтинентальным орогенам речь идет об известных особенностях рельефа кровли и подошвы коры, когда под горными поднятиями в виде хребтов в коре наблюдаются корни, а под активно развивающимися осадочными бассейнами (впадинами) — антикорни. Соответственно тектонофизические реконструкции тектонических напряжений по данным механизмов очагов землетрясений

показали (Ребецкий и др. 2013; Rebetsky et al., 2012), что в верхней части коры поднятий (глубины до 20 км), как правило (70% процентов состояний), имеет место субгоризонтальная ориентация оси максимального сжатия (геодинамические режимы горизонтального сжатия или сдвига), а в верхней части коры впадин наблюдается субгоризонтальная ориентация оси минимального сжатия — максимальное девиаторное растяжение (геодинамические режимы горизонтального растяжения или сдвига). Данных о напряженном состоянии низов коры для таких структур в настоящее время нет.

Обычно при объяснении механизма формирования внутриконтинентального орогена опираются только на данные об особенностях рельефа кровли коры (Лобковский и др., 2004), определяя его как общелитосферную складку, вызванную латеральным сжатием. Считается при этом, что после потери устойчивости верхней части коры и формирования чередующихся поднятий и впадин за счет явления изостазии происходит формирование корней и антикорней для участков горных поднятий и впадин. Однако наши исследования (Ребецкий, 2012; Ребецкий, Погорелов, 2013) и численные модели других исследователей (Cloetingh et al., 2002) показывают, что, после потери устойчивости верхней упругой части коры и до тех пор пока внешнее боковое сжатие продолжает активно деформировать литосферную плиту, изостатические процессы себя практически не проявляют. То есть под участками волнообразных поднятий и впадин не образуется корней и антикорней. Возможно, для общелитосферной складки их удастся получить, если привлечь процессы преобразования вещества в зонах активного деформирования.

С другой стороны, в работе (Тимошкина и др., 2010) объяснение формирования внутриконтинентальных орогенов рассматривалось с позиции мелкомасштабной астеносферной термогравитационной конвекции. В выполненных в этих работах расчетах показано, что над конвектирующей астеносферой формируется структура в виде понятий и обрамляющих их впадин, под которыми образуются корни и антикорни соответственно.

Таким образом, существуют два механизма внешнего нагружения литосферы внутриконтинентальных орогенов, в которых удастся получить наблюдаемые особенности рельефа кровли коры. В первом источник энергии деформирующих сил расположен в соседних литосферных блоках (плитах), а во втором в мантии (астеносфере).

Можно предположить, что существуют и другие механизмы нагружения литосферы, спо-

собные создать особенности структуры, наблюдаемые для внутриконтинентальных орогенов. К ним можно отнести инверсию плотности в средней коре (внутренний энергетический источник), а также ротационные механизмы, о которых говорится в работе нашего оппонента (Викулин, 2016). Возможно, что и для этих механизмов нагружения удастся получить наблюдаемые в природе структуры. Существование некоторого множества вероятных механизмов нагружения коры орогенов, создающих рельеф ее кровли, подобный природному, отражает тот факт, что мы путем перебора прямых задач механики на самом деле решаем обратную задачу геодинамики. Единственность решения этой обратной задачи зависит от широты спектра сопоставляемых параметров, наблюдаемых в природе и полученных в расчетах.

Особенность исследований лаборатории тектонофизики ИФЗ РАН, заложенная еще ее создателем М.В. Гзовским, состоит в том, что основной упор в обосновании единственности механизма деформирования внутриконтинентального орогена осуществляется за счет привлечения данных об особенностях напряженного состояния коры участков горных поднятий и впадин. Иными словами, без анализа сил — напряжений мы не разберемся в движениях — деформациях.

Переходя далее ко второму замечанию, отметим, что под ротационным фактором А.В. Викулин (2016, стр. 103) подразумевает «комплекс вращательных движений, совершаемых нашей планетой ... вокруг своей оси ... вокруг Солнца ... и вокруг центра Галактики». Почему мы считаем, что ротационные эффекты и в частности те, о которых говорится в работе (Викулин, 2016), в приложении к орогенам не имеют места. Дело в том, что возникновение ротационных напряжений в деформированном блоке земной коры (например, в области горного поднятия), должно формировать достаточно специфическую картину ориентации главных осей напряжений (рис. 1а). Точно также специфической должна выглядеть ориентация касательных напряжений (рис. 1б), действующих на подошве блока земной коры (поддвиговые касательные напряжения), вращающегося за счет внутреннего момента сил.

В тоже время результаты тектонофизической реконструкции природных напряжений показывают, что в коре для различных региональных тектонических обстановок (внутриконтинентальные орогены, зоны субдукции океанических плит) таких циркуляционных направленностей ориентации осей главных напряжений и подвиговых касательных напряжений не наблюдается (рис. 2, 3).

Эти разъяснения в более краткой форме были даны нашему рецензенту-оппоненту, но,

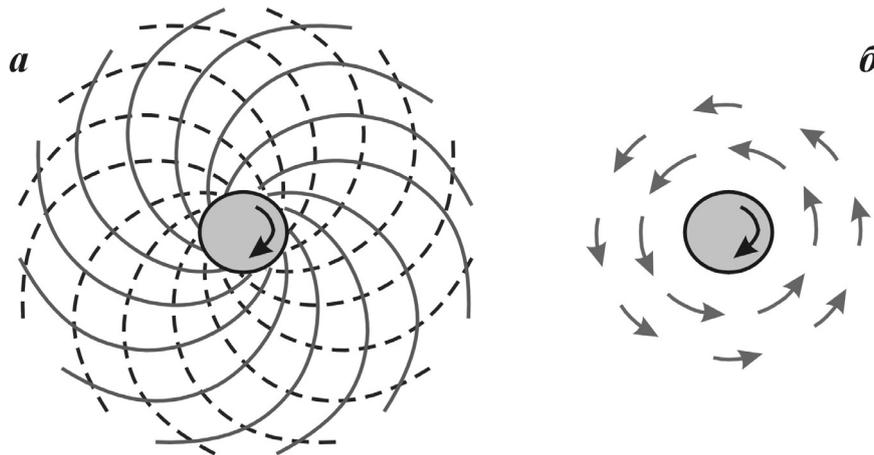


Рис. 1. Траектории осей максимального девиаторного сжатия (сплошная линия) и девиаторного растяжения (пунктирная линия) (а) и поддвиговых касательных напряжений, действующих на подошве коры, в окрестности блока, вращающегося относительно вертикальной оси (б).

как видим, они им были либо не поняты, либо не приняты.

Теперь несколько слов о вкладе ротации в геодинамику. Мы не против таких подходов, но они требуют тщательного обоснования числом. Что касается конкретных работ А.В. Викулина (Викулин, 2008а; Викулин, Иванчин, 2013), то в них существует несколько принципиальных ошибок физического и механического генезиса. Из-за этого в этих работах на много порядков был завышен уровень деформирующих инерционных сил и ротационных напряжений. Далее рассмотрим только физическую сторону проблемы, выясним генезис и оценим амплитуды деформирующих сил, возникающих в связи с обсуждаемой проблемой. Решение краевой задачи механики о вращении блока под действием массовых (объемных) сил, откуда вытекают уровни формирующихся тектонических напряжений, здесь рассматриваться не будет.

Для начала о терминологии. Словосочетание «ротационная геодинамика» (РГ) стало достаточно часто употребляемым термином, в котором объединены взгляды на происходящие в литосфере деформационные процессы с позиции влияния на них суточного вращения Земли и взаимодействия нашей планеты с другими космическими телами (Луна, Солнце и т.д.). Все эти воздействия на планету можно объединить термином «космогенные», а напряжения, им отвечающие, называть «планетарными», т.к. они должны иметь общепланетную закономерность. Важно отметить, что объединяющим моментом всех космогенных воздействий является то, что вызываемые ими деформирующие силы являются инерционными, связанными с криволинейными и вращательными движениями. Эти инерционные силы действуют в каждой точке массы/объема среды. Вращательные движения, возникающие в результате неоднородного

деформирования, вызванного другими способами нагружения (например, из-за конвекции в мантии или латерального движения тектонических плит) не являются космогенными, общепланетарными и их генезис не связан с инерционными силами.

В XX веке изучение проблемы влияния суточного вращения Земли на напряженное состояние коры и мантии происходило в работах (Лейбензон, 2010; Ляв, 1935; Молоденский, 1953; Парийский, 1954; Манк, Макдональд, 1964; Стюарт, 1975). По мере развития этих исследований эволюционировали оценки интенсивности влияния данного явления на напряжения. В первых работах были получены значения девиаторных напряжений, большие по значению, чем модуль упругости пород. Затем пришло понимание, что эти напряжения на геологических временах могли давно релаксировать. Стали говорить о влиянии изменения скорости суточного вращения Земли на напряженное состояние в литосфере и коре, имеющих наибольшую вязкость и, следовательно, наибольшие времена релаксации напряжений — длительную память о возникающих упругих деформациях. Эта эпоха завершилась работой Парийского (1956), в которой была высказана аргументированная числом критика идей М.В. Стюарта. Было показано, что уровень напряжений, которые могут возникнуть в литосфере из-за изменения вращения Земли, крайне мал.

Новый всплеск интереса к роли космогенных воздействий произошел уже в XXI веке. Вышло несколько монографий (Вихри ..., 2004; Викулин, 2008б; Долицкий, 2000; Одесский, 2004), посвященных данной проблеме, практически на каждой геофизической конференции можно встретить доклады по вышеупомянутой теме. При этом следует отметить, что в большинстве случаев в таких работах либо приводятся достаточно общие соображения о влиянии обо-

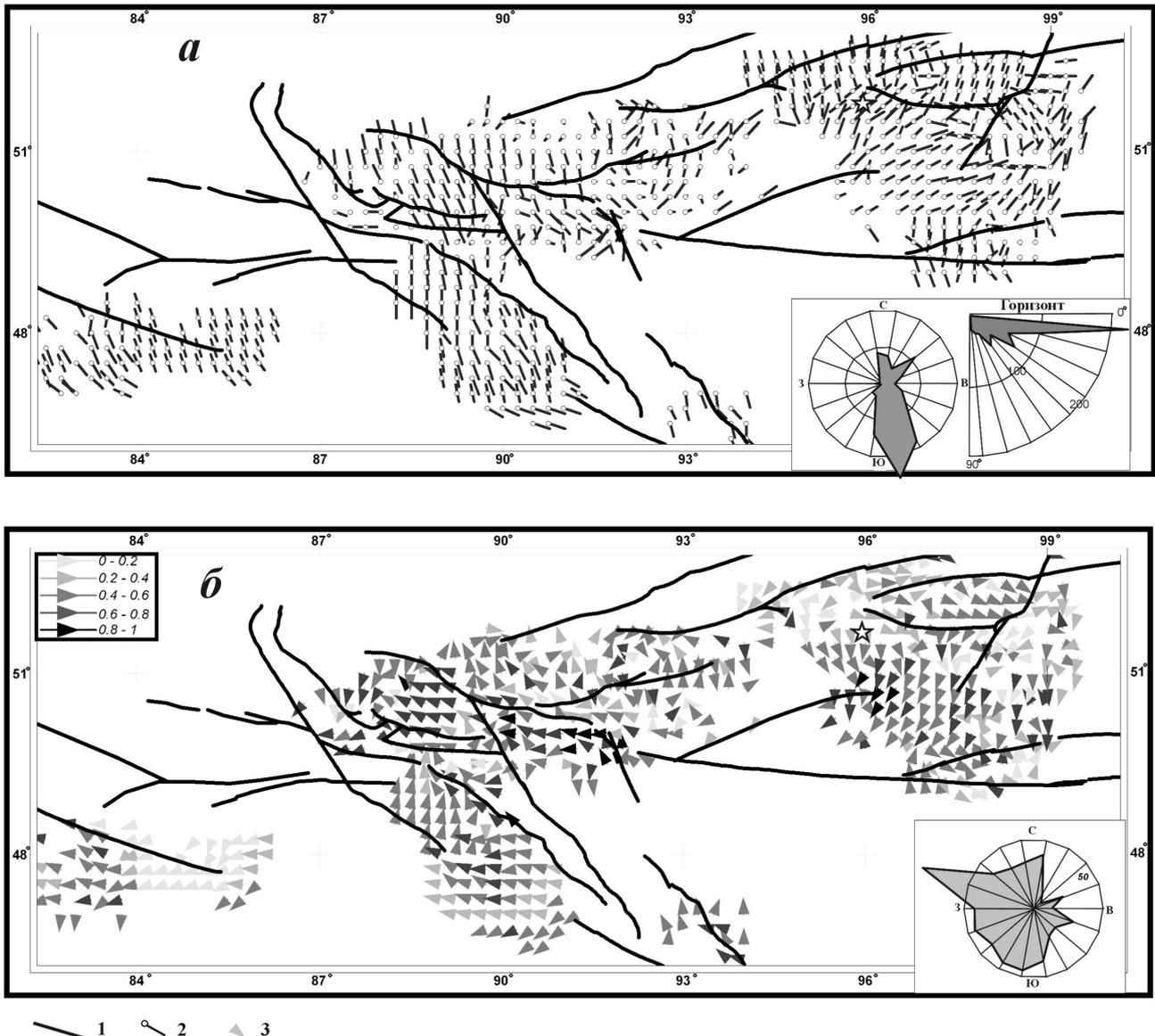


Рис. 2. Напряженное состояние в коре Алтае-Саян по работе (Ребецкий и др., 2013): *а* — ориентация осей максимального сжатия, построенных в направлении их погружения; *б* — направления и относительные величины (нормировка на максимальное касательное напряжение) поддвиговых касательных напряжений. 1 — разломы; 2 — оси максимального сжатия; 3 — оси поддвиговых касательных напряжений.

значенных явлений, либо представлен только статистический анализ взаимосвязи с ними сейсмичности, вулканизма и др. локально мощных геодинамических событий. В этих работах, за редким исключением, не выполнялся анализ деформирующих сил и тем более планетарного напряженного состояния, вызванного космогенными явлениями. Одним из таких исключений являются исследования А.В. Викулина (2008а), в которых обсуждаются геомеханические аспекты проблемы.

Говоря о роли космогенных воздействий на напряженное состояние коры и литосферы в целом, необходимо решить две проблемы. Во-первых, надо четко понять, какое физическое явление ответственно за изучаемые деформиру-

ющие силы. Во-вторых, следует оценить уровень сил, возникающих в коре из-за действия космогенных факторов. В третьих, необходимо отделить большие деформации, которые вызваны давно релаксированными напряжениями, от малых упругих деформаций сегодняшнего дня. Эти простые соображения в современных исследованиях мало учитываются. Рассмотрим данную проблему на примере изучения роли суточного вращения Земли.

Мы знаем три типа инерционных сил, связанных с вращением: центробежные силы; силы Кориолиса; гироскопические силы. Выполним оценку этих сил для литосферы Земли.

1. *Центробежные силы в коре* (рис. 4а) зависят от радиуса Земли ($R_E \approx 6370$ км), плотности пород

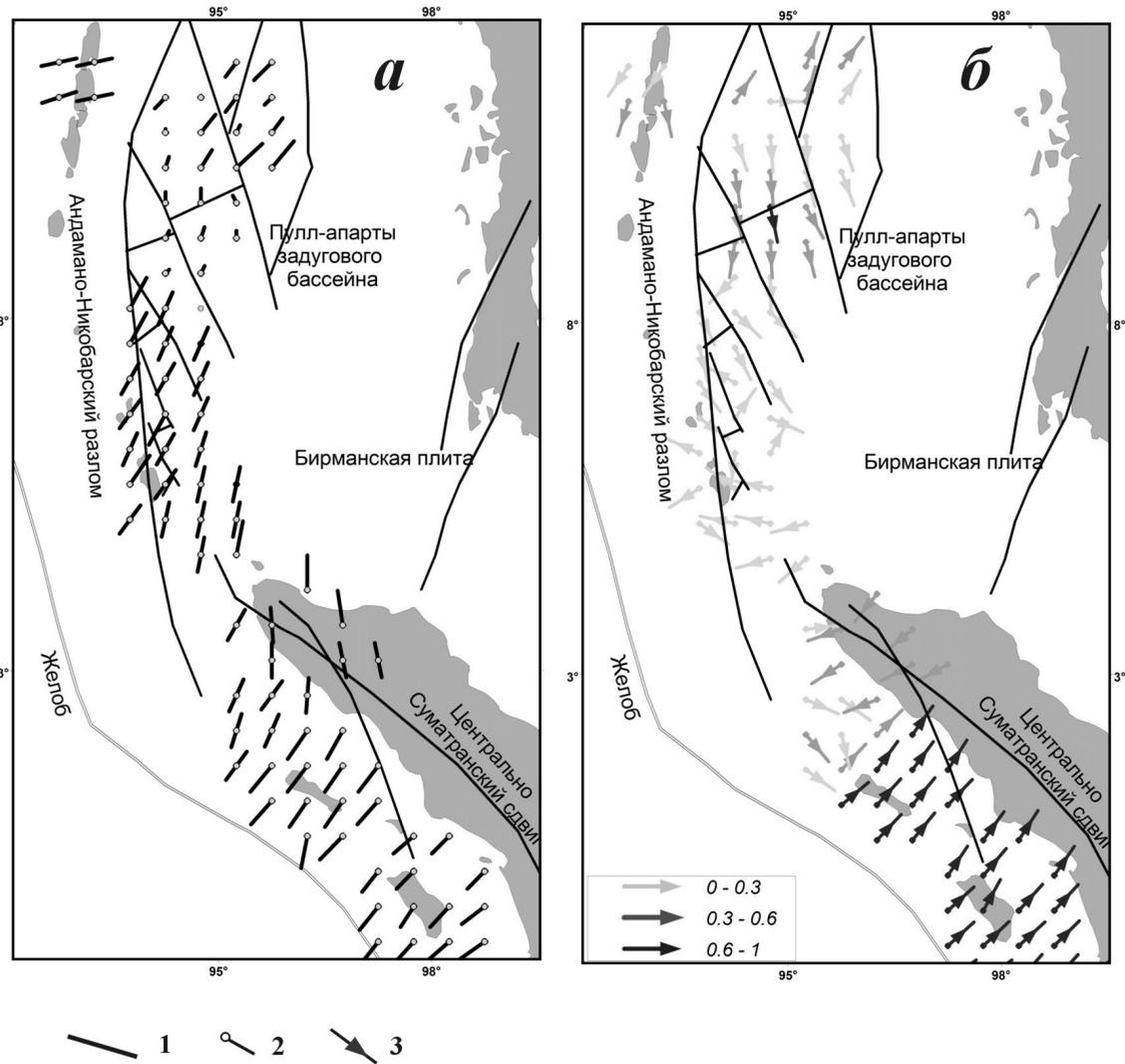


Рис. 3. Напряженное состояние в коре западного фланга Зондской дуги по работам (Ребецкий, Маринин, 2006; Rebetsky, Tatevossian, 2013): *а* — ориентация осей максимального сжатия, построенных в направлении их погружения; *б* — направления и относительные величины (нормировка на максимальное касательное напряжение) поддвиговых касательных напряжений. В правом нижнем углу представлены роза-диаграммы представительности азимутов осей и углов погружения для осей главных напряжений и роза-диаграмма представительности направлений поддвиговых касательных напряжений. 1 — разломы; 2 — оси максимального сжатия; 3 — оси поддвиговых касательных напряжений.

($\rho \approx 2.7 \text{ г/см}^3$) и скорости суточного вращения Земли ($\omega_E \approx 7.29 \cdot 10^{-5} \text{ сек}^{-1}$):

$$F^\omega = f^\omega \cos \theta$$

при $f^\omega = \omega_E^2 R_E \rho \approx 0.91 \cdot 10^{-2} \text{ Г/см}^3$. (1)

Максимальные значения центробежной инерционной силы, наблюдаемые на экваторе ($\theta = 0$), почти в 300 раз меньше массовых сил, вызванных гравитационным взаимодействием ($\rho g = 2.7 \text{ Г/см}^3$). Считается, что для сфероидальной (эллипсоид вращения) формы Земли сумма центробежных и массовых гравитационных сил действует по нормали к поверхности Земли. Отклонение от этого правила могут возникать только на некоторых временах за счет измене-

ния скорости вращения Земли. В эти моменты времени центробежные силы могут создавать тангенциальную компоненту, направленную по касательной к поверхности планеты (рис. 4а). Проблема состоит в том, как определить такую тангенциальную компоненту?

В работе (Ребецкий, 2016) выполнена оценка таких инерционных сил для случая, когда на широте 45° отклонение отвесной линии от нормали к усредненной поверхности Земли достигает 10 секунд. В этом случае на этой широте тангенциальная составляющая инерционных сил $F_\theta^\omega = 1.3 \cdot 10^{-4} \text{ Г/см}^3$.

Напряжения, отвечающие таким тангенциальным массовым силам, в коре достигают 100 бар.

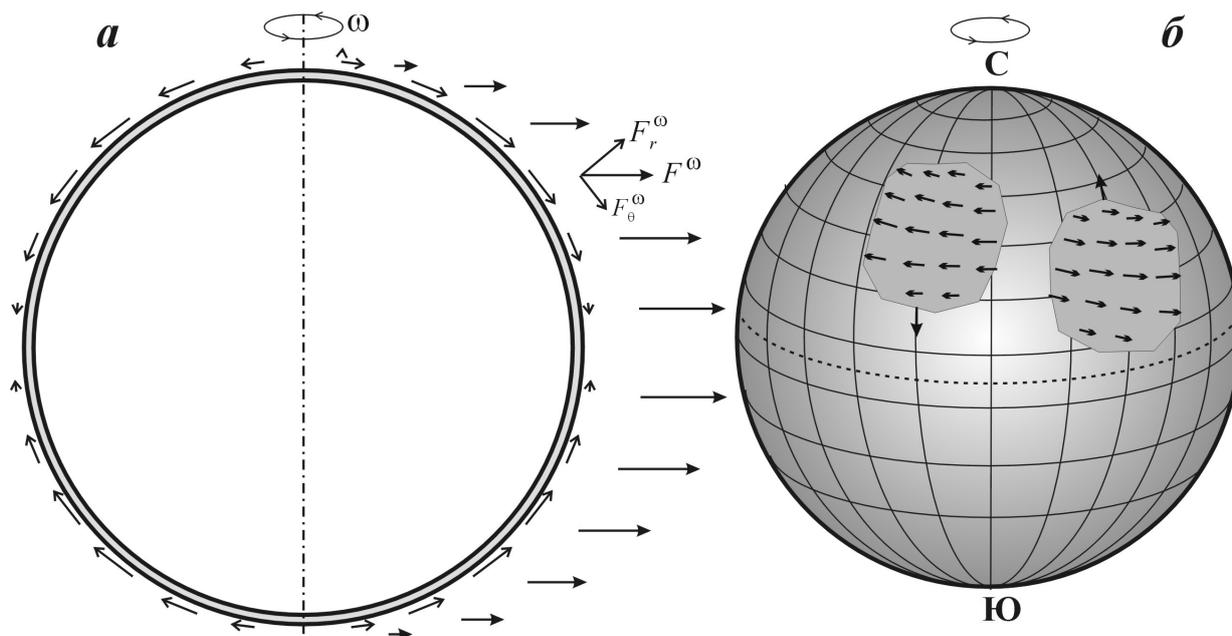


Рис. 4. Центробежные (а) и кориолисовы (б) силы для вращающейся Земли (ω — угловая скорость вращения, F^ω , F_r^ω , F_θ^ω — соответственно центробежная сила и ее компоненты в радиальном и тангенциальном направлениях).

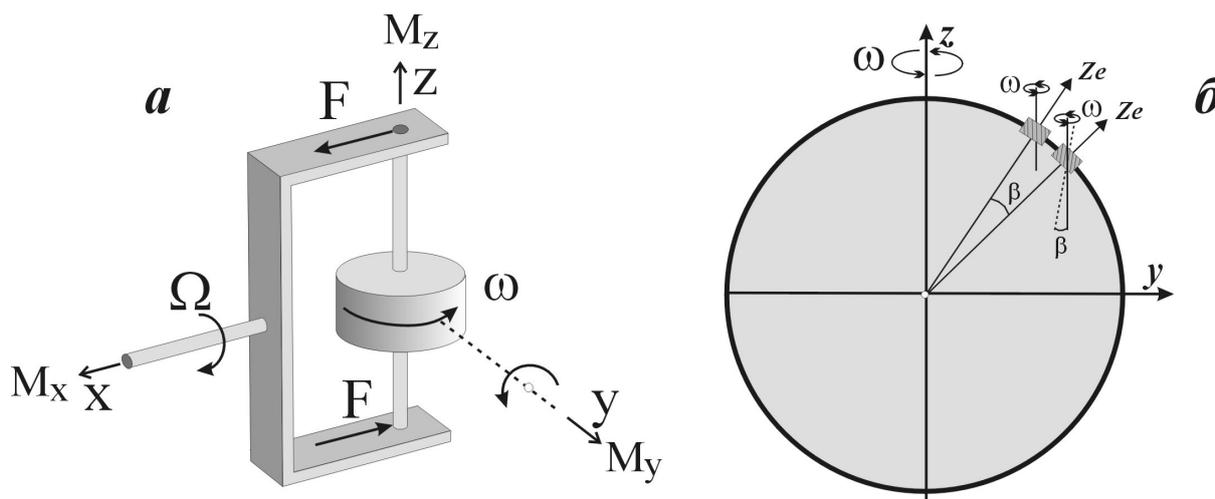


Рис. 5. Примеры возникновения гироскопических сил: а — в валу, вращающемся относительно оси z с угловой скоростью ω при повороте тела гироскопа с угловой скоростью Ω относительно оси x (M_x и M_y — моменты импульса относительно осей x и y , а M_z — момент импульса гироскопических сил, F — реактивная пар сил, возникающая во внутренних элементах гироскопа); б — в блоке земной коры, испытывающем меридиональное движение, в процессе которого на малую величину (β) изменяется угол между вектором на зенит (Ze) и осью вращения Земли (ω — угловая скорость суточного вращения).

2) Кориолисовы силы, ориентированные вдоль параллелей (рис. 4б), возникают, когда литосферная плита испытывает движение, имеющее меридиональную компоненту. Эти силы для средней скорости движения континента $U_T = 10$ см/год ($3.17 \cdot 10^{-7}$ см/сек) в пределах литосферы приблизительно одинаковые:

$$F^K = f^K \sin \theta$$

при $f^K = \omega_E U_T \rho \approx 6.2 \cdot 10^{-12}$ Г/см³. (2)

Кориолисовы силы на 12 порядков меньше, чем массовые силы тяжести

3) Гироскопические силы (рис. 5а) возникают в блоке земной коры или литосферной плите, испытывающей движение с ненулевой меридиональной компонентой. Они связаны с законом сохранения момента вращения в блоке характерным радиусом $L_C = 100$ км (по работам А.В. Викулина) из-за суточного вращения Земли (рис. 5б). Максимальные их значения достигаются вблизи границ двигающегося блока:

$$F^G = f^G \sin 2\theta$$

$$\text{при } f^G = \omega_E U_T \frac{L}{R_E} \rho \approx 0.98 \cdot 10^{-13} \text{ Г/см}^3. \quad (3)$$

Если в качестве характерного размера движущегося блока земной коры принять 1000 км (континент в целом), то инерционные силы могут достигать 10^{-12} Г/см³.

Таким образом, инерционные силы, связанные с движением блоков земной коры (континентов) на вращающейся Земле, на восемь порядков меньше инерционных сил, вызываемых собственно суточным вращением. И это понятно, т.к. скорость вращательного движения ($\omega_E R_E \approx 4.64 \cdot 10^5$ см/сек) на много порядков превышает скорость тектонического движения блоков ($\omega_E R_E \gg U_T$).

Проведенный анализ величин деформирующих литосферу инерционных сил, связанных с суточным вращением Земли, показывает их малость. Однако это не означает, что мы всегда должны ими пренебрегать. Как выше было сказано, центробежные инерционные силы могут быть не полностью компенсированы формой Земли и они действуют однонаправленно на больших расстояниях (тысячи километров). Это обстоятельство требует дополнительного анализа последствий таких воздействий. Что касается кориолисовых и гироскопических сил, то оценка величины, основанная на генезисе этих сил, связанном с суточным вращением Земли вокруг своей оси, показывает их незначительность. Таким образом, гипотеза о ведущей роли гироскопических сил данного генезиса, высказанная в работах в ряде работ А.В. Викулина, выглядит *излишне оптимистической*. По мимо этого факта отмеченные ранее особенности поля напряжений для ротационных структур (рис. 1) для оси вращения блока, совпадающей с осью на зенит, не находят своего подтверждения в исследованиях природного напряженного состояния (рис. 2, 3).

Именно эти обстоятельства не позволяют нам при изучении механизмов формирования внутриконтинентальных орогенов использовать конкретные идеи о влиянии ротации Земли, высказанные в работах А.В. Викулина.

Список литературы

Викулин А.В. Проблема ротационных движений в геологии (Отзыв на статью Д.С. Мягкова, Ю.Л. Ребецкого «Эволюция структуры течения рельефа коры эпиплатформенных орогенов под воздействием мелкомасштаб-

ной астеносферной конвекции») // Вестник КРАУНЦ, Науки о Земле. 2016. № 1. Вып. 29. С. 101–105.

Викулин А.В., Иванчин А.Г. О современной концепции блочно-иерархического строения геосреды и некоторых ее следствиях // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых (ФТПРПИ). 2013. № 3. С. 67–84.

Викулин А.В. Энергия и момент силы упругого ротационного поля // Геология и геофизика. 2008а. Т. 49. № 6. С. 559–570.

Викулин А.В. Мир вихревых движений. Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ. 2008б. 230 с.

Вихри в геологических процессах / Ред. А.В. Викулин. Петропавловск-Камчатский: КГПИ, 2004. 297 с.

Долицкий А.В. Вращение мантии по ядру: движение географических и геомагнитных полюсов, периодичность геологических и тектонических процессов. М.: ОИФЗ РАН, 2000. 42 с.

Лейбензон Л.С. Деформация упругой сферы в связи с вопросом о строении Земли. М.: Тип. Имп. Моск. университета, 1910. 125 с.

Лобковский Л.И., Никишин А.М., Хаин В.Е. Современные проблемы геотектоники и геодинамики. М.: Научный Мир, 2004. 612 с.

Ляв А. Теория упругости. М: ОНТИ НКТП СССР 1935. 675 с.

Манк У., Макдональд Г. Вращение Земли. М.: Мир, 1964. 384 с.

Молоденский М.С. Упругие приливы, свободная нутация и некоторые вопросы строения Земли // Труды Геофизического института АН СССР. 1953. Т. 146. № 19. С. 3–52.

Одесский И.А. Ротационно-пульсационный режим Земли и его геологические исследования. СПб.: Пангея, 2004. 27 с.

Парийский Н.Н. Неравномерность вращения земли. М.: Изд-во АН СССР, 1954. 90 с.

Парийский Н.Н. Замечания к вопросу о критических параллелях М.В. Стоваса и к вопросу о солнечной обусловленности нерегулярных изменений скорости вращения Земли // Астрономический журнал. 1956. Т. 33. № 4. С. 627–630.

Ребецкий Ю.Л. Об одной новой форме неустойчивости континентальной коры // Осадочные бассейны и геологические предпосылки прогноза новых объектов, перспективных на нефть и газ. Материалы XLIV тектонического совещания. Т. II. М.: ГЕОС, 2012. С. 355–359.

Ребецкий Ю.Л. Об особенности напряженного состояния коры внутриконтинентальных орогенов // Геодинамика и тектонофизика. 2015. Т. 6. Вып. 4. С. 437–466.

Ребецкий Ю.Л. Оценка влияния суточного вращения Земли на напряженное состоя-

- ние континентальной коры // ДАН. 2016. № 6. С. 230–234.
- Ребецкий Ю.Л., Кучай О.А., Маринин А.В.* Напряженное состояние и деформации земной коры Алтае-Саян // Геология и геофизика. 2013. Т. 54. № 2. С. 271–291.
- Ребецкий Ю.Л., Маринин А.В.* Поле тектонических напряжений до Суматра-Андаманского землетрясения 26.12.2004. Модель метастабильного состояния горных пород // Геология геофизика. 2006. Т. 47. № 11. С. 1192–1206.
- Ребецкий Ю.Л., Погорелов В.В.* Тектонофизическая модель механизма нагружения и эволюции напряженно-деформированного состояния литосферы континентальных горно-складчатых областей // Геологическая история возможные механизмы и проблема формирования впадин с субокеанической и аномально тонкой корой в провинциях с континентальной литосферой. Материалы XLV тектонического совещания. Т. II. М.: ГЕОС, 2013. М.: ГЕОС. С.181–185.
- Ребецкий Ю.Л., Сычева Н.А., Сычев В.Н. и др.* Напряженное состояние коры Северного Тянь-Шаня по данным сейсмической сети КНЕТ // Геология и геофизика. 2016. Т. 57. № 3. С. 496–520.
- Саньков В.А., Парфеевец А.В., Лухнев А.В. и др.* Позднекайнозойская геодинамика и механическая сопряженность деформаций земной коры и верхней мантии Монголо-Сибирской подвижной области // Геотектоника. 2011. № 5. С. 52–70.
- Стовас М.В.* Избранные труды. М.: Недра, 1975. 155 с.
- Тимошкина Е.П., Леонов Ю.Г., Михайлов В.О.* Формирование системы горное сооружение – предгорный прогиб: геодинамическая модель и ее сопоставление с данными по северному Предкавказью // Геотектоника. 2010. № 5. С. 3–21.
- Cloetingh S., Buriv E., Andeweg B. et al.* Lithospheric folding in Iberia // Tectonics. 2002. V. 21. № 5. 1041. P. 5-21–2-26. doi:10.1029/2001TC901031.
- Rebetsky Yu.L., Sycheva N.A., Kuchay O.A., Tatevossian R.E.* Development of inversion methods on fault slip data. Stress state in orogenesis of the central Asia // Tectonophysics. 2012. V. 581. P. 114–131.
- Rebetsky Yu.L., Tatevossian R.E.* Rupture propagation in strong earthquake sources and tectonic stress field // Bulletin Society Geology France. 2013. V. 184. № 4–5. P. 335–346.

Ю.Л. Ребецкий,
зав. лаб., д.ф.-м.н. ИФЗ РАН

Д.С. Мягков,
мнс ИФЗ РАН