

УДК 550.34+551.24

**О СОВРЕМЕННОЙ КОЦЕПЦИИ БЛОЧНО-ИЕРАРХИЧЕСКОГО
СТРОЕНИЯ ГЕОСРЕДЫ И НЕКОТОРЫХ ЕЕ СЛЕДСТВИЯХ
В ОБЛАСТИ НАУК О ЗЕМЛЕ**

А. В. Викулин¹, А. Г. Иванчин²

¹Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, E-mail: vik@kscnet.ru,
бульвар Пийпа, 9, г. Петропавловск-Камчатский, 683006, Россия

²ООО Торговый дом “Музыка”, E-mail: ivanchin@tdm.su,
ул. Фрунзе, 20, 683000, г. Томск, Россия

Обсуждается и находит свое дальнейшее развитие известная концепция блоковой геосреды А.В. Пейве–М. А. Садовского в области наук о Земле. Показано, что слагающие геосреду структурные блоки, механически взаимодействуя между собой, приводят к возникновению момента сил. Это позволило построить ротационную модель геосреды и предсказать существование “ротационных” волн. В рамках этой модели дано объяснение реидным свойствам геосреды. Оказалось, что характерные значения скоростей “ротационных волн” близки к скоростям волн маятникового типа (μ -волн по В. Н. Опарину).

Геосреда, напряжения с моментом силы, “ротационные волны”, реидность, волны маятникового типа

ВВЕДЕНИЕ

В работе [1] Нобелевский лауреат в области физики Ричард Фейнман отмечает: “Относительности вращения” не существует. Вращающаяся система — не инерциальная система, и законы физики в ней другие”.

Выдающимся достижением научной мысли последних десятилетий в науках о Земле стало обоснование гипотезы *блокового строения* геологической [2] и геофизической [3] сред — *геосреды* [4] и каноничности ее дискретных свойств [5, 6]. Такие “блоковые” представления, как показывают работы ряда исследователей [7], использовались без того индивидуального для каждого блока смысла, который в случае вращения геосреды определяется классическими законами механики.

Свойства геоблоков изучаются на примерах реальных горных, включающих месторождения полезных ископаемых, породных массивов учеными Института горного дела СО РАН и их коллегами из других институтов и учреждений [8]. На основе многолетних экспериментальных и теоретических исследований, проводимых большими коллективами ученых в течение последних десятилетий, сформулировано новое научное направление в горных науках — “нелинейная геомеханика” [9, 10]. В основу этого фундаментального для наук о Земле направления исследований заложены как теоретические представления о ключевой роли линейного коэффициента вложения геоблоков для смежных иерархичных блоков [9], так и возникновение волн маятникового типа, близких по существу деформационным волнам [10].

В рамках этого направления исследований в последние годы по тематике настоящей статьи получены важные практические и теоретические результаты, последовательно представленные в [11–14].

Так, в 2004 г. В. Н. Опариним с соавторами обнаружен “пульсирующий режим” сейсмоэнерговыведения из напряженных участков рудного и породного массивов [15] и получено экспериментальное подтверждение существования волн маятникового типа в блочных геосредах [16–18]. В 2005 г. ими же доказано, что такой пульсирующий режим сейсмоэнерговыведения является важным диагностическим показателем уровня напряженно-деформированного состояния контролируемых участков породного массива [19]. Создана полевая система автоматизированной регистрации параметров процесса деформирования горных пород, обеспечивающая оценку их напряженного состояния и механических свойств, а также проведены исследования затухания маятниковых волн в различных условиях [20–22]. Эти работы активно продолжаются. Решены вопросы контроля нелинейных квазистатических и волновых процессов в породных массивах, обладающих блочно-иерархическим строением [14, 20, 21]. Определены кажущиеся и действительные скорости распределения волн смещений, связанных с колебаниями блоков при воздействиях ударом, и исследовано распространение маятниковых волн при импульсном воздействии типа “центр вращения” [14]. В результате выявлены новые важные свойства блочных сред. В силу своей “локальности”, эти результаты не учитывали вращения Земли.

В настоящей работе рассматриваются ротационные свойства блоков геосреды, которыми они обладают как части *вращающегося* тела — Земли.

Вращательные (поворотные) движения геоблоков и так называемый ротационный фактор — вращение Земли вокруг своей оси — играют важную роль в геодинамике. Полный и разно-сторонний обзор данных о таких движениях содержится в монографии [23]. Согласно имеющимся данным, вращательные движения отдельно взятых геоблоков, тектонических плит и их образований в виде разнообразных геологических структур являются распространенным явлением. Например, Сибирская платформа на протяжении палео-мезопротерозоя (2.5–1 млрд л. н.) располагалась главным образом в приэкваториальных и низких северных широтах, испытывая квази-колебательные повороты относительно меридиана с амплитудой до 45°, а с конца палеопротерозоя по начало неопротерозоя (1.6–1 млрд л. н.) она повернулась против часовой стрелки на угол порядка 90° [24]. Выявлены колебательные движения и других литосферных плит и геологических структур, в частности Тихоокеанской плиты, двигавшейся как целое в течение последних 40 млн лет вокруг Гавайской горячей точки с периодом около 6–7 млн лет и с амплитудой до 10° [25].

Отмеченные исследователями угловые скорости вращения геологических структур и геоблоков заключены в достаточно больших пределах. Развитые в последние десятилетия инструментальные методы площадных наблюдений и их количественного анализа, в первую очередь долговременные наблюдения за различными геофизическими полями, включая плотные сети GPS наблюдений за движениями обширных участков поверхности Земли, позволяют сузить возможный диапазон скоростей вращательных движений. Геофизические наблюдения, проводимые в течение продолжительного отрезка времени, позволили сформулировать вывод о том, что о. Пасхи (300 × 400 км²) в Тихом океане за время своего существования в течение примерно 5 млн лет повернулся почти на 90° [26], что соответствует угловой скорости $0.5\pi \text{ рад}/5 \cdot 10^6 \text{ лет} \approx 3 \cdot 10^{-7} \text{ рад/год}$. Данные плотной GPS сети геодезических пунк-

тов, полученные в течение более чем 10 лет непрерывных наблюдений в Центрально-Азиатском районе, выявили следующее. Весь Центрально-Азиатский район ($38^\circ \leq \varphi \text{ с.ш.} \leq 45^\circ$, $69^\circ \leq \lambda \text{ в.д.} \leq 81^\circ$) представляет собой совокупность, состоящую из вращающихся в разные стороны со скоростями $0.03 - 5$ мс/год (или $10^{-10} - 10^{-8}$ рад/год) 28 блоков с размерами от 50 до 500 км [27]. Таким образом, данные инструментальных наблюдений показали, что наиболее вероятный диапазон угловых скоростей вращения блоков и плит является достаточно широким: $10^{-8} - 10^{-6}$ рад/год, и он включает в себя практически все данные о скоростях вращения геоблоков, плит и платформ, полученные другими авторами. И такие поворотные движения связаны с вращением самой Земли [23].

Как известно, литосфера находится в постоянном движении, вследствие чего слагающие ее блоки трансляционным образом могут перемещаться вдоль поверхности Земли. Например, пусть геоблок из положения A через некоторое время перемещается в положение B (рис. 1а). Это и определяет специфические “ротационные” свойства блоковой литосферы. Угловая скорость Ω , с которой вращается в данный момент времени жестко связанная с телом (Землей) система координат, оказывается в известном смысле не зависящей от этой системы — все такие системы вращаются в заданный момент времени вокруг параллельных друг другу осей с одинаковой по абсолютной величине скоростью Ω [28]. Поэтому каждый блок (и/или плита) литосферы независимо от его (ее) размера характеризуется одинаковым моментом импульса \mathbf{M} , направленным параллельно оси вращения Земли: $\mathbf{M} = m\Omega$ [28]. Здесь m — момент инерции блока (плиты), величина которого при их перемещении и, как следствие, возможной деформации, может изменяться. Движение литосферы должно было бы приводить к изменению направления момента импульса $\mathbf{M}_1 \rightarrow \mathbf{M}_2$. Но это невозможно, поскольку момент импульса должен сохраняться, а блок должен вращаться вместе с Землей с угловой скоростью Ω . Это приводит к появлению момента силы \mathbf{K} , прикладываемому к блоку со стороны *окружающей* его среды — литосферы (рис. 1б).

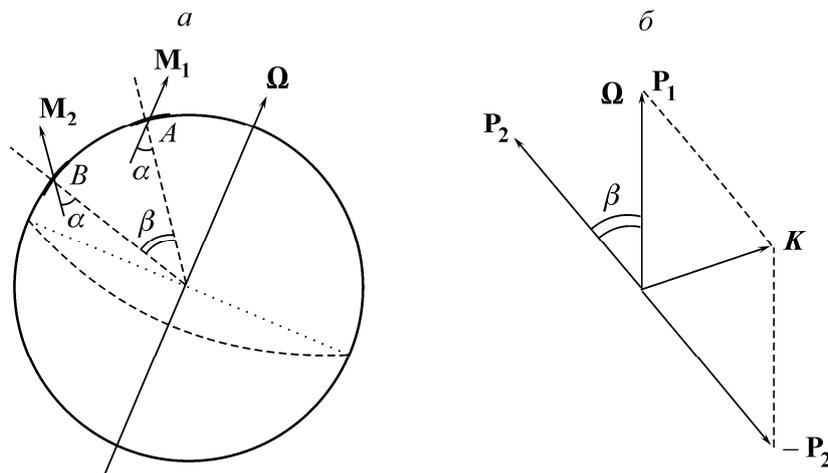


Рис. 1. Движение блока литосферы из положения A с моментом импульса \mathbf{M}_1 в положение B с моментом \mathbf{M}_2 (поворот блока на угол β) сопровождается “генерацией” в литосфере момента силы \mathbf{K} (рис. 1б), пояснения в тексте

Для определения величины и направления момента силы \mathbf{M}_1 применим следующий “мысленный” эксперимент. Сначала в положении B останавливаем блок (который считаем однородным объемом шаровой формы), прикладывая к нему упругие напряжения с моментом

силы $-\mathbf{P}_2$. Затем раскручиваем его до начального состояния с моментом \mathbf{M}_1 , прикладывая к нему упругие напряжения с моментом силы \mathbf{P}_1 . Полагая, что в каждом случае преобразование кинетической энергии вращения блока в упругие напряжения и наоборот происходит изотермически, без потери энергии ($|\mathbf{P}_1| = |\mathbf{P}_2| = \mathbf{P}$), для момента силы \mathbf{K} по теореме косинусов получаем

$$|\mathbf{K}| = 2P \sin \beta / 2. \quad (1)$$

Важно, что упругие напряжения с моментом силы \mathbf{K} прикладываются к блоку через его поверхность со стороны *окружающей* его среды (литосферы).

Таким образом, приходим к модели, в которой описание движения блока вращающейся с угловой скоростью Ω геосреды механически эквивалентно движению блока под действием *собственного момента импульса* \mathbf{M} (поворачиванию блока на угол β), который в окружающем блок пространстве создает упругое поле с моментом силы (1). Генерируемое при таком ротационном движении блока поле упругих напряжений является следствием закона сохранения момента количества движения.

“Внутренний” или собственный момент \mathbf{M} (по сути — спин) обладает специфическим для геодинамики свойством — он не исчезает в литосфере за счет пластической деформации блока. Поэтому ротационные напряжения с моментом силы (1) в результате трансляционного движения блока (вследствие увеличения угла поворота блока β) могут в литосфере “накапливаться”, чем и можно объяснить такое известное свойство геосреды, как ее энергонасыщенность [29].

Впервые на основании анализа большого *геологического* материала на свойство геосреды обладать *внутренним потенциалом движения* обратил внимание в 1961 г. А. В. Пейве [2]. Механическое обоснование модели с моментом количества движения *конечного* объема сплошной среды на примере магнитоактивных сред впервые дано Л. И. Седовым в 1969 г. [30]. Понятие блоковой (естественно кусковой) среды в геофизику введено в 1979 г. М. А. Садовским [3]. Возможность канонического представления дискретных свойств объектов геосреды впервые дано В. Н. Опариним в 2007 г. [5, 6]. Анализ механических, геологических и геофизических свойств геосреды провел А. В. Пономарев в 2008 г. Это позволило ему сделать вывод о том, что геосреда “располагает *собственным энергетическим потенциалом*” [29]. Со звучным результатом многолетних геологических исследований является вывод М. Г. Леонова: “Парадигма внутренней объемной мобильности ... консолидированной земной коры ... должна стать одной из основ геодинамики” [31].

Ротационная модель с собственным моментом блока для сейсмического процесса в пределах окраины Тихого океана построена А. В. Викулиным и А. Г. Иванчиным в начале 1990-х гг. [32, 33]. При построении ротационной модели, лежащей в основе описания сейсмического процесса, авторы опирались на экспериментальные данные о наличии поворотов на большие углы мезоструктур твердого тела, на геологические данные о вращении геологических блоков, блоковые представления М. А. Садовского и на известные данные о существовании взаимосвязи между сейсмичностью и режимом вращения Земли вокруг своей оси. Впоследствии стало ясно, что вся эта совокупность исходных данных, по сути, может быть сведена к геолого-геофизическим блоковым А. В. Пейве–М. А. Садовского, механическим макроскопическим Л. И. Седова, ротационным (без сдвига) В. Е. Панина [34] и мезомеханическим канонически дискретным, по В. Н. Опарину [5, 6], представлениям [35, 36].

РОТАЦИОННЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ И ИХ СВОЙСТВА

Будем полагать, что в окружающем породном массиве поворачивающийся под действием собственного момента импульса блок литосферы (которую считаем неподвижной) создаются упругие напряжения с моментом силы (1). Для определения упругих напряжений σ , их энергии W и момента силы (сейсмического момента) K , создаваемых поворачивающимся под действием собственного момента K блока шаровой формы с радиусом R_0 , для твердого тела $r \geq R_0$ поставим следующую задачу, учитывающую уравнение упругого равновесия

$$\text{grad div } U - a \cdot \text{rot rot } U = 0$$

с нулевыми смещениями на бесконечности

$$|U| \rightarrow 0 \quad \text{при} \quad r = (x_1^2 + x_2^2 + x_3^2)^{1/2} \rightarrow 0$$

и действующей на блок объемом V силой, равной нулю

$$F_i = \int \sigma_{ij} n_j dS = 0,$$

а также с отличным от нуля моментом сил, не зависящим от размера блока:

$$K_i = \int x_k e_{ikl} \sigma_{lj} dS_j.$$

Здесь $a = (1 - 2\nu)/2(1 - \nu)$, ν — коэффициент Пуассона; R_0 — радиус области; e_{ikl} — тензор Леви-Чивита. Интегрирование в последних двух выражениях производится по поверхности поворачивающегося блока.

Авторами получено аналитическое решение задачи в сферической системе координат (r, θ, φ) с началом $r = 0$ в центре блока и с плоскостью $\theta = 0$, ортогональной K , для момента силы K :

$$K = -8\pi^{3/2} \Omega R_0^4 \sqrt{\frac{\rho G}{5}} \sin \beta / 2. \quad (2)$$

Знак минус означает, что момент действует на геоблок со стороны тела (литосферы). При этом энергия W определяется равенством

$$W = \frac{16}{15} \pi \rho \Omega^2 R_0^5 \sin^2 \beta / 2, \quad (3)$$

напряжение:

$$\sigma_{r\varphi} = \sigma_{\varphi r} = 4\Omega R_0^4 r^{-3} \sqrt{\frac{\rho G}{5\pi}} \sin \theta \sin \beta / 2, \quad r \geq R_0. \quad (4)$$

Остальные компоненты тензора напряжений равны нулю. Здесь $\rho \approx 3$ г/см³ и $G \approx 10^{12}$ дин/см² — плотность и модуль сдвига геосреды, $\Omega = 7.3 \cdot 10^{-5}$ рад/с — угловая скорость вращения Земли вокруг своей оси. Прямой подстановкой полученных решений (2)–(4) в исходные уравнения можно убедиться, что они являются точными.

Выражения (2) и (4) численными коэффициентами отличаются от таких же выражений, полученных в [33, 35], в которых из-за принятия допущений они больше в 1.3 и 2.8 раза соответственно. Следовательно, предыдущие оценки, проводимые с точностью до порядка величины, остаются в силе. В частности, для землетрясений с магнитудами $M \approx 8$ (7.5–8.5), для которых характерны очаги с “радиусами” $R_0 \approx 100$ км, теоретические величины $K \approx 10^{27}$ дин·см и $\sigma \approx 10^2 - 10^3$ бар, полученные на основании модельных соотношений (2) и (4), практически совпадают с такими же экспериментально определенными значениями сейсмического момента и

сброшенных в очаге напряжений [37]. Углы поворота блока — очага землетрясения — при этом должны составлять $\beta_0 = 10^{-4} - 10^{-2}$ рад (10^{-3} рад), что при повторяемости таких землетрясений в одном месте один раз в 100–1000 лет соответствует угловой скорости $10^{-7} - 10^{-4}$ рад/год.

Как видим, диапазон угловых скоростей поворота геоблоков, определенный в рамках ротационной модели, “пересекается” с диапазоном таких же скоростей, установленным на основании инструментальных геофизических измерений, что может свидетельствовать в пользу рассматриваемой нами ротационной блоковой модели и ее следствий.

Параметр β не является для ротационной модели критическим: в случае $\beta = 0$ в среде, которая остается блоковой, исчезают ротационные напряжения с моментом силы. Поэтому для геосреды, которая является нелинейной, близость модельной (расчетной) и экспериментально определенной угловых скоростей можно рассматривать как существование “внутренней” согласованности между блоковым строением геосреды и скоростью ее движения вдоль поверхности Земли.

В модели двух блоков R_{01} и R_{02} , расположенных на расстоянии l друг от друга, оказалось возможным аналитически рассчитать энергию их взаимодействия W_{int} [33]. Для этого в выражении энергии, обусловленной взаимодействием двух блоков ($W = G \int (a_1 + a_2)^2 dV = G \int a_1^2 dV + G \int a_2^2 dV + 2G \int a_1 a_2 dV = W_1 + W_2 + W_{int}$, где $a_{1,2}$ — тензоры упругой деформации, создаваемые каждым из двух поворачивающихся блоков в отдельности), рассчитывалось третье слагаемое, равное удвоенному произведению первого и второго инвариантов тензора напряжений для упругой энергии. В результате для энергии такого взаимодействия получено выражение

$$W_{int} = \frac{3}{2} \pi \rho \Omega^2 R_{01}^4 R_{02}^4 l^{-3} \cos \phi, \quad (5)$$

где ϕ — угол между моментами блоков. Каждый блок за счет этой энергии стремится повернуть другой блок. Момент силы, обусловленный взаимодействием блоков, определяется дифференцированием (5) по углу ϕ :

$$K_{int} = -\frac{3}{2} \pi \rho \Omega^2 R_{01}^4 R_{02}^4 l^{-3} \sin \phi. \quad (6)$$

Момент силы (6) приложен со стороны упругого поля к поверхности каждого из блоков и направлен таким образом, чтобы уменьшить энергию их взаимодействия. Этот момент для обоих блоков имеет одно и то же абсолютное значение, но для разных блоков он имеет противоположные направления.

Для равновеликих блоков $R_{01} = R_{02}$ отношение момента взаимодействия блоков (6) к собственному моменту блока (2) находится из соотношения

$$\frac{K_{int}}{K} = \frac{3}{16\sqrt{5}\pi} \frac{\Omega R_0}{V_S} \left(\frac{R_0}{l} \right)^3 \frac{\sin \phi}{\sin \beta/2} = \chi,$$

из которого видно, что моментное взаимодействие становится тем более существенным, чем больше центробежная скорость $V_R = \Omega R_0$ (т. е. чем с большей скоростью Ω вращается тело и чем больше размер блока R_0 ; $V_S = \sqrt{G/\rho}$ — скорость поперечных сейсмических волн). Максимальное ($\sin \phi = 1$) “моментное” расстояние $l = l_{0K}$, на котором момент упруго-

го поля K_{int} (6) будет равным ($\chi = 1$) собственному моменту блока K (2), при принятых выше параметрах модели m запишется в виде

$$l_{0K} = \sqrt[3]{\frac{3}{8\sqrt{5\pi}}} \beta_0^{-1/3} \left(\frac{V_R}{V_S}\right)^{1/3} R_0 \approx R_0. \quad (7)$$

Таким образом, “предельное” *моментное взаимодействие* между геоблоками распространяется на небольшие расстояния (не превышающие размеров блока) и, как и силы молекулярного взаимодействия между частицами среды в классической теории упругости, по сути является *близкодействующим*.

Аналогичным образом, рассчитывая отношение энергии взаимодействия блоков (5) к собственной энергии блока (3) для расстояния $l = l_{0W}$, характеризующего “предельное” энергетическое взаимодействие, получаем выражение

$$l_{0W} = \sqrt[3]{6} R_0 \beta_0^{-2/3} \approx 10^2 R_0. \quad (8)$$

Из него следует, что ротационное упругое поле, ответственное за “энергетическое” взаимодействие, распространяется на существенно бóльшие расстояния: на два порядка превышающие размеры блоков и является, таким образом, *дальнодействующим*.

Итак, геосреда в неинерциальной системе координат в рамках представленной “ротационной модели” характеризуется своеобразным корпускулярно-волновым типом взаимодействия между блоками. Во-первых, близкодействием — путем обмена моментами K_{int} (6) рядом расположенных блоков, а не за счет (как в моментной теории упругости) трения вдоль их границ, которое в рамках ротационной модели препятствует взаимодействию блоков. Примеры такого взаимодействия в сейсмологии известны. К ним, в первую очередь, относятся сильнейшие землетрясения-дуплеты (и мультиплеты) с близкорасположенными очагами. Здесь кроме сильнейших сотрясений на обширных участках поверхности Земли *всегда* возбуждаются интенсивные собственные колебания планеты. Во-вторых, дальнодействием — путем обмена энергиями W_{int} (5) между блоками на больших (много больше размера блока) расстояниях. Примеры такого взаимодействия в сейсмологии также широко известны — это “миграция” очагов землетрясений вдоль сейсмических поясов на многие десятки тысяч километров [38], удаленные форшоки и афтершоки [39] и пары землетрясений [35].

Близкодействие и дальнодействие в физике часто связывается с корпускулярным (через границы частиц) и волновым (через среду, в которой частицы находятся) взаимодействиями. В рамках блоковой концепции геосреды слагающие ее структурные элементы могут рассматриваться как “элементарные” частицы. Следовательно, взаимодействие блоков в рамках ротационной модели по своей физической сути может являться отражением общего физического принципа — корпускулярно-волнового дуализма: в движении геологических блоков, тектонических плит и других геологических структур проявляются как корпускулярные, так и волновые черты. Покажем это на примере взаимодействия блоков между собой в рамках “ротационной модели”.

О “РОТАЦИОННЫХ ВОЛНАХ” В БЛОКОВЫХ ВРАЩАЮЩИХСЯ ГЕОСРЕДАХ

Для блока, генерирующего упругое поле с моментом силы (2) и взаимодействующего упругими полями, генерируемыми другими равновеликими блоками цепочки масс, получен закон движения в виде синус-Гордона (СГ) уравнения [32]. При этом сейсмический пояс моделировался одномерной цепочкой взаимодействующих между собой блоков земной коры с

очагами землетрясений. Каждый блок характеризовался моментом инерции I и объемом $V = 4/3(\pi R_0^3)$. Тогда уравнение движения блока можно записать в виде $I \frac{\partial^2 \beta}{\partial t^2} = K_1 + K_2$, где K_1 — момент силы, соответствующий полю упругих напряжений, создаваемых отдельно взятым блоком в соответствии с (2); K_2 — момент силы, отвечающий за взаимодействие блока с остальными блоками цепочки. Из самых общих соображений полагалось, что K_2 пропорционален как упругой энергии, накопленной в результате движения рассматриваемого блока $V \frac{\partial^2 \beta}{\partial z^2}$, так и упругой энергии, соответствующей всем остальным блокам механической цепочки. В результате уравнение движения блока в безразмерном виде приобретает вид

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial \xi^2} - \frac{\partial^2 \theta}{\partial \eta^2} = \sin \theta,$$

где $\theta = \beta/2$, $\xi = k_0 z$ и $\eta = v_0 k_0 t$ — безразмерные координаты; z — расстояние вдоль цепочки масс (блоков); t — время. Принимая длину волны близкой размеру блока $\lambda \approx R_0$, волновое число $k_0 = 2\pi/R_0$, для характерной скорости развития процесса v_0 получаем

$$v_0 = \sqrt{\frac{15}{8\pi^2 \sqrt{5\pi}} \Omega R_0 \sqrt{G/\rho}} \approx \sqrt{\frac{\sqrt{15}}{8\pi^2} V_R V_S} = 0.2 \sqrt{V_R V_S}. \quad (9)$$

Вид закона предопределен выражением для момента силы упругого поля в виде (2). СГ-уравнение является следствием закона сохранения момента импульса. Это принципиальный момент, который позволяет в ротационной задаче о цепочке взаимосвязанных между собой блоков не прибегать к их взаимодействию за счет трения, как это предполагается в моментной теории упругости (см., например, [40]). Как следствие, такой подход при условии, что решения (2) и (3) ротационной задачи о поле напряжений вокруг поворачивающегося под действием собственного момента блока получены в рамках классической теории упругости [41] с симметричным тензором напряжений (4), дает возможность физически “прозрачно” интерпретировать характерную скорость геофизического процесса, описываемого уравнением СГ.

Из (9) видно, что при фиксированных физических параметрах (G , ρ , R_0) скорость v_0 зависит только от угловой скорости Ω , т. е. причиной возникновения данного типа деформации на самом деле является именно *вращение Земли* [42]. Отсюда и название модели, данное ей авторами, — ротационная [32, 33]. При принятых выше характерных параметрах земной коры значение характерной скорости составляет $v_0 = 10 - 10^2$ м/с.

Анализировался в большей степени соответствующий реальному сейсмическому процессу случай цепочки с неоднородными вращениями блоков, характеризующимися отклонениями моментов сил от равновесных положений μ , с учетом сил трения α вдоль их границ. Здесь, опять, трение рассматривается не как механизм взаимодействия блоков между собой в результате их “зацепления” друг за друга, как в моментной теории упругости, а как диссипативный фактор, который в результате действия сил трения между блоками препятствует их ротационному взаимодействию. В результате закон движения блока в цепочке получен в виде модифицированного уравнения СГ [42]:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial \xi^2} - \frac{\partial^2 \theta}{\partial \eta^2} = \sin \theta + \alpha \frac{\partial \theta}{\partial \eta} + \mu \delta(\xi) \sin \theta,$$

которое решалось численно методом возмущений МакЛафлина–Скотта. Здесь $\delta(\xi)$ — функция Дирака. Начальные условия соответствовали средней скорости деформирования в сейсмоактивных областях. При модельных расчетах коэффициенты трения α и неоднородности μ соответствовали реальным разломам. Анализ показал, что для режима замедленного сейсмического процесса, при котором взаимодействие блоков (очагов землетрясений) между собой осуществляется в основном за счет медленных движений — крипа, асимптотическое значение скорости передачи ротационных деформаций составляет $c_0 \approx 1-10$ см/с [42].

Таким образом, можно принять, что характерная скорость $\{v_0, c_0\}$ передачи ротационных деформаций солитонного типа (напряжений с моментом силы) в рамках блоковой модели нелинейной геосреды может быть записана в виде

$$c_0 = \gamma \sqrt{V_R V_S}, \quad c_0 \approx 1-10 \text{ см/с}, \quad (10)$$

где $\gamma = K^{-1} \approx 10^{-4}$ — нелинейный параметр, характеризующий реальную (разновеликую и неравномерно вследствие трения вращающуюся) цепочку блоков (т. е. совокупность очагов землетрясений, заполняющих собой сейсмический пояс); $K \approx 10^4(10^3-10^5)$ — коэффициент нелинейности геосреды, равный отношению модулей упругости третьего порядка к модулям упругости второго порядка (линейным модулям упругости) [4].

СГ-уравнение имеет много решений. Моделируя движения в длинных молекулярных цепях, А. С. Давыдов показал [43], что волновые движения в таких цепях описываются двумя типами возбуждений: солитонами и экситонами — решениями (1) и (2) на рис. 2 соответственно. Характерными для таких решений являются “предельные” скорости, соответствующие максимальным энергиям возбуждения E_{\max} : V_{01} и V_{02} .

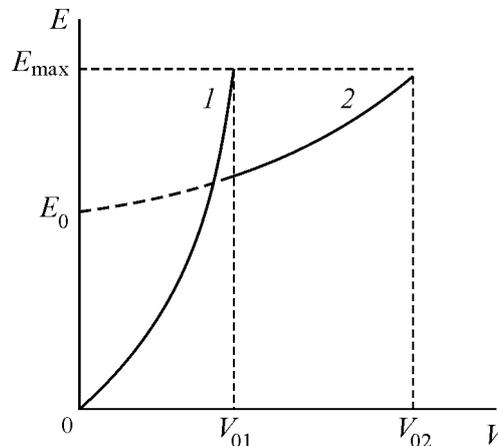


Рис. 2. Волновые решения $E(V)$ СГ-уравнения [43]: 1 — солитоны; 2 — экситоны. V_{01} , V_{02} — характерные скорости процесса, соответствующие “предельным” энергиям $E = E_{\max}$ солитонному ($0 \leq E \leq E_{\max}$, $0 \leq V \leq V_{01}$) и экситонному ($0 \leq E_0 \leq E \leq E_{\max}$, $V_{01} \leq V \leq V_{02}$) решениям соответственно. E_{\max} — максимальное значение энергии, соответствующее коллективному возбуждению всей совокупности молекул в цепочке (очагов землетрясений в сейсмическом поясе в геосреде), как целой, остающейся неподвижной, со скоростью $V = 0$

Все опубликованные и полученные авторами скорости миграции очагов тихоокеанских землетрясений представлены на рис. 3 [44]. По данным рис. 3, глобальная, вдоль всего сейсмического пояса, (I) и локальная, в пределах очагов сильных землетрясений, (II) миг-

рационные зависимости $M_{1,2}(\lg V_{1,2})$, предельные значения скоростей $V_{1,2,\max}$ и соответствующие им наибольшие магнитуды $M_{1,2,\max}$ составляют:

$$M_1 \approx 2 \lg V_1, \quad V_{1,\max} \approx 1-10 \text{ см/с}, \quad M_{1,\max} = 8.5-9, \quad (11)$$

$$M_2 \approx \lg V_2, \quad V_{2,\max} \approx V_S - V_P \approx 4-8 \text{ км/с}, \quad M_{2,\max} = 8.3. \quad (12)$$

Сравнение данных на рис. 2 и 3, на котором магнитуда землетрясения M и сбрасываемая упругая энергия E связаны соотношением $M \approx \lg E$ [Дж], показывает следующее. Теоретические модельные для молекулярных цепей (рис. 2) и экспериментальные миграционные для цепочек очагов землетрясений (рис. 3) зависимости качественно совпадают между собой. Это позволяет интерпретировать экспериментальные миграционные зависимости (11) и (12) как солитонное и экситонное решения СГ-уравнения, имеющие характерные предельные скорости $V_{01} = V_{1,\max}$ и $V_{02} = V_{2,\max}$. При этом предельная скорость солитонного (I) на рис. 2 решения $V_{01} = 1-10$ см/с совпадает с характерной скоростью c_0 (10) в рамках ротационной блоковой модели нелинейной геосреды, что дает возможность интерпретировать последнюю как предельную скорость солитонного решения СГ-уравнения V_{01} .

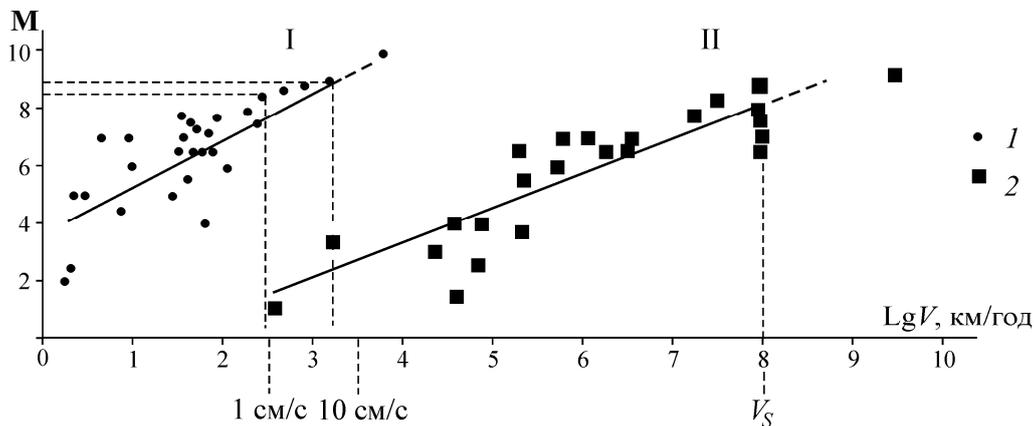


Рис. 3. Значения скоростей глобальной (I — вдоль всей окраины) и локальной (2 — в пределах индивидуальных очагов сильных землетрясений) миграций тихоокеанских землетрясений как функции их магнитуды M [35]: I, II — глобальная и локальная зависимости $M(\lg V)$ соответственно, определенные методом средних квадратов; V_S — скорость поперечных сейсмических волн

Таким образом, математическая близость решений волновых уравнений для цепочек, составленных из блоков (I и II, рис. 3, соотношения (11) и (12)) и молекул (1 и 2, рис. 2), которые являются одномерными и длинными, позволили допустить, что и взаимодействие их элементарных составляющих имеют одинаковую физику.

Известно, что солитонные решения СГ-уравнения характеризуются рядом важных свойств, соответствующих свойствам реальных элементарных частиц [45], в то время как экситоны являются такими возмущениями, которые в линейном приближении вырождаются в обычные волны [43], в нашем случае — в продольные V_P и поперечные V_S волны. Поэтому выявленные в рамках ротационной модели солитонное и экситонное решения с предельными скоростями $V_{01} \approx c_0$ и $V_{02} = V_S \div V_P$ могут быть новым типом упругих волн в твердых телах — ротационными волнами [46, 47], которые во вращающихся средах (геосреде) отвечают за корпускулярно-волновые взаимодействия блоков между собой.

СВЕРХПЛАСТИЧНЫЕ (РЕИДНЫЕ) СВОЙСТВА ГЕОСРЕДЫ

Имеется много свидетельств движения земной поверхности в направлении от очагов землетрясений в виде “горбов Земли” [23]. Например, “по поверхности террасы прошла волна высотой 20–30 см — совершенно бесшумно, и земная твердь на мгновение превратилась в пластическую субстанцию, ... а еще через мгновение поверхность террасы опять стала плоской и абсолютно ровной. И никаких следов деформации!” [31]. Или: “во время землетрясения ... по бетонному шоссе и тротуарам шли волны высотой 1.2–1.8 м и длиной 3 м, но на бетоне не появилось ни одной трещины” [48]. Анализ инструментально зарегистрированных движений вблизи очага сильного Паркфилдского (Калифорния) 1966 г. землетрясения позволил сделать вывод, что движение грунта (с характерной продолжительностью 10–100 с) вблизи образовавшегося разлома, скорее, характерно для жидкости [49]. Породы, слагающие вихревые структуры, возможно, в течение сотен тысяч (10^{12} с) — миллионов (10^{13} с) лет формировались “в твердом состоянии на месте и за счет вещества верхней мантии” как дугообразные, а не механически изгибались из первоначально прямолинейных структур” [50].

Анализ позволил связать “бухтообразные” предвестники землетрясений с вероятными пульсациями отдельных участков поверхности Земли с характерными периодами ~ 100 дней (10^5 с). К числу таких пульсаций можно отнести “куполообразное вспучивание (Сан-Андреас, США), охватившее территорию с поперечником $\sim 2 \cdot 10^4$ м и высотой ~ 0.5 м. Наделав много шума и не оправдав опасений сейсмологов, вспучивание “благополучно” исчезло [51]. К числу такого рода эффектов, по-видимому, можно отнести и свидетельство летописца, относимое к 1601 г. на Валдае: “И с того озера Бросна выходила из воды гора песчаная, а ото dna воды в верх с сажень и стояла так двенадцат дней. ... И по двенадцат днях опустилась ... и над него глубины стало семь сажен, как и прежде” [52]. Летом 2011 г. достаточно большой участок побережья Таманского полуострова протяженностью 435 м и шириной 50 м, вероятно, в течение одного месяца испытал поднятие с максимальной амплитудой до 3,4 м; при этом ни сейсмическая, ни вулканическая активность в районе поднятия и вблизи от него не зафиксирована [53]. Анализ такого рода вариаций показал [51], что их “разнознаковость при наблюдаемой быстротечности свидетельствует о процессе *в жидкой фазе*”.

Все геофизические и геологические данные о таких “медленных” движениях геосреды с характерными длительностями $10-10^{13}$ с, рассматриваемые в совокупности, позволили геологам в 1930-х гг. ввести в рассмотрение реидные [54, 55] или сверхпластичные деформации Земли “как течение материала в твердом состоянии” [31]. Покажем, что такое состояние геосреды является прямым следствием ее ротационного движения.

Согласно обзору развития представлений о реологических свойствах вещества Земли [44], температура Дебая θ_d для геосреды может быть записана в виде [56]

$$\theta_d \approx 10^{-3} \bar{V}(H) \sqrt[3]{\rho(H)}, \quad (13)$$

где \bar{V} — средняя скорость возбуждений в геосреде, см/с; ρ — плотность среды, г/см³; H — глубина. При средней скорости (определяемой продольной и поперечной сейсмическими скоростями) для литосферы и верхней мантии, изменяющейся в пределах 1–10 км/с, температура Дебая достаточно высока; для глубины $H = 100$ км она составляет $\theta_d \approx 660^\circ$, $K \approx 1000^\circ\text{C}$ и хорошо соответствует широко распространенной модели физики Земли [56].

Ситуация кардинальным образом меняется при переходе к ротационной моде c_0 (10), определяемой коллективным движением совокупности геоблоков, тектонических плит и геологических структур. Характерное для такой моды предельное значение c_0 , как видно из (10), на пять порядков меньше поперечной и продольной сейсмических скоростей, и температура Дебая для нее составляет весьма малую величину:

$$\theta_d \approx 10^{-2} K,$$

которая и определяет возможность квантового, без трения, сверхтекучего движения геосреды — ее реидность [54, 55] и/или сверхпластичное течение в твердом состоянии [31].

Температура Дебая пропорциональна максимально возможной частоте колебаний слагающих среду частиц [57] или мезообъемов для твердого тела или геоблоков, тектонических плит и других геологических структур для Земли. Для Земли такой частотой, как показано нами [58], является частота Чандлера, с которой колеблются все слагающие сеймотектонический пояс блоки в совокупности. Именно колебание всего пояса как целого и определяется энергией “нулевых” колебаний E_0 (рис. 2).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ. РОТАЦИОННЫЕ И МАЯТНИКОВЫЕ ВОЛНЫ (μ -ВОЛНЫ ПО В. Н. ОПАРИНУ)

Приведенные в работе данные и полученные результаты позволяют сформулировать следующие взаимосвязанные выводы.

Существенным положением ротационной модели является *симметричность тензора напряжений*, генерируемых в нелинейной геосреде движущимися блоками (4), что находится в полном соответствии с основополагающим *физическим* принципом классической теории упругости [41]. В то же время все чаще используются *математические* модели с несимметричным тензором напряжений. Кратко проблема обсуждалась в работе [35]; ее суть сводится к следующему.

В работе [59] говорится о том, что “в первых изданиях курса Л. Д. Ландау и Е. М. Лифшица существовали запретительные теоремы на асимметрию тензора напряжений. Лишь относительно недавно эти недоразумения устранены”. Относительно времени опубликования “запретительных теорем” авторы [59], по-видимому, не точны. Второе доказательство симметричности тензора напряжений, основанное на достаточно общей микроскопической теории, приведено уже последователями Л. Д. Ландау и Е. М. Лифшица в четвертом издании курса “Теория упругости”, опубликованным в 1987 г. (см., например, [41]). Напомним, что первое издание этого курса Л. Д. Ландау и Е. М. Лифшица увидело свет в 1944 г. Кем и когда были “устранены недоразумения” и почему “недоразумения”, авторы в своей работе [59] не поясняют. Вопрос о допустимости асимметрии тензора напряжений при решении физических задач обсуждается в монографии [60]. Однако и в ней не приводятся конкретные данные, которые опровергали бы физическую суть симметричности тензора напряжений. Представление же тензора напряжений в антисимметричном виде “как дивергенция тензора более высокого порядка” (см. соотношение (5.2.24) в [60]), на самом деле рассматривается в курсе Л. Д. Ландау и Е. М. Лифшица. И в этом курсе показывается, что именно такой “несимметричный тензор может быть приведен к симметричному виду” [41]. Увеличивающееся в последние годы число высказываний “в пользу” несимметричности тензора напряжений [40, 59, 60 и др.] является, очевидно, попыткой

доказать *физическую* обоснованность возможности привлечения к задачам мезомеханики [34, 61] и геомеханики [40, 59 и др.] *математических* континуумов с несимметричным тензором напряжений. Например, отсутствие *физического* смысла у заложенной в основе моментной теории упругости (см. [62]) модели братьев Коссера было показано практически сразу после появления такой модели в 1910 г. [63]. Следует отметить, что на “невозможность существования упруго-вязкоупругих волн”, распространяющихся в рамках такого рода моделей [40, 59; и др.] вдоль литосферных разломов, обращено внимание в работе [64].

Симметричность тензора напряжений, помимо своего четкого теоретического объяснения, есть экспериментальный факт, подтвержденный более чем 300-летним периодом измерений. Физическая беспредметность дискуссии о допустимости применения моделей с несимметричным тензором напряжений к решению физических задач, по сути, — дискуссии о нарушении закона сохранения момента импульса при взаимодействии макрочастиц тела между собой, очевидна. Она свидетельствует лишь об отсутствии таких моделей и твердого тела и геологической среды, в которых можно было бы совмещать повороты слагаемых их мезоструктур и блоков с симметричностью тензора напряжений [35]. В ротационной модели блоковой вращающейся геосреды с симметричным тензором напряжений [32, 33, 35, 36, 42, 44, 46, 58, 65–67] такое “совмещение” удалось реализовать, поэтому она является физически обоснованной.

Волновые теоретические модельные солитонные и экситонные решения описывают природный процесс миграции очагов землетрясений, протекающий как в пределах всего сейсмического пояса, так и в очагах сильных землетрясений. Характерные скорости солитонных $V_{01} \approx c_0$ и экситонных $V_{02} \approx V_S \div V_P$ волн являются предельными скоростями, определяющими максимально возможные скорости передачи возмущений в геодинамических процессах глобальной (волновой) и локальной (моментной) миграции очагов землетрясений. В соответствии с классификацией [68], эти волны соответствуют медленным и быстрым тектоническим (деформационным) волнам. Такие скорости определяются параметрами Ω , R_0 и V_S , характерными для *всей планеты* в целом [44]. Такой “дуализм” в достаточно общем плане “роднит” ротационные волны в нелинейной блоковой вращающейся среде с гравитационными возмущениями и соответствующими им предвестниками землетрясений и извержений вулканов [69] и позволяет для описания ротационных волн использовать неевклидовы модели деформирования материалов на различных структурных уровнях [70]. Отметим, что анализ концепции “блоковости” геосреды привел А. Ф. Ревуженко с коллегами [12, 71] к близкому, по сути, выводу — к возможности использования при описании свойств блоковых сред концепции “неархимедова пространства и времени”.

Корпускулярно-волновой дуализм наиболее отчетливо экспериментально проявляется в процессах с характерными размерами, близкими к квантовым: фотоэффект, дифракция микрочастиц. И, тем не менее, после классических работ Луи де Бройля и А. Эйнштейна сложилась полная уверенность в том, что такой дуализм — неотъемлемое свойство материи независимо от пространственно-временного масштаба рассмотрения. Близкодействующий и далекодействующий характер взаимодействия блоков геосреды, являющихся макроскопическими по своим размерам и временам жизни частицами, с одной стороны, может рассматриваться как подтверждение корпускулярно-волнового дуализма де Бройля–Эйнштейна, с другой — открывает принципиально новые возможности исследования природы такого дуализма [35].

Физически более информативной для описания деформационного процесса является не величина угла поворота блока β , а ее производная по времени, т. е. скорость поворотного деформирования, являющаяся функцией угловой скорости вращения Земли Ω и скорости распространения волны поворота, представляющая собой уединенную поперечную волну, поляризованную перпендикулярно к направлению распространения [42]. Возможность такого представления ротационных волн позволяет провести их сопоставление с маятниковыми волнами (μ -волнами — по В. Н. Опарину).

В рамках также блокового подхода, но с несколько других позиций — развития трещин в пространстве, когда главными являются процессы “композиции и декомпозиции вещества Земли” [72], показывается существование в геосреде маятниковых волн, как волн, определяющих геодинамические процессы [73]. Скорости маятниковых волн, как и ротационных, меньше скоростей продольных волн. Экспериментальное обоснование существования маятниковых волн проводится путем анализа колебательного процесса в цепочках жестких массивных блоков, являющихся аналогом цепочки блоков в ротационной модели. В цепочках жестких массивных блоков выделены два типа волн [20], как и в ротационной модели. При этом экспериментальные определения, проведенные в лаборатории, для скоростей маятниковых волн дают значения $10^2 - 10^3$ м/с [72], в том числе и значения, близкие к скоростям сейсмических волн. Натурные определения скорости маятниковых волн 1–10 см/с [72] оказались близкими характерной скорости ротационных волн $c_0 \approx V_{01}$.

Как видим, в рамках волновой геодинамики оба подхода, развиваемые в работах [23, 24, 26, 27, 29, 33, 35, 37, 46, 65–67] и [5, 8, 10, 11, 20, 72, 73], независимо друг от друга дают близкие результаты. Более того, уже введение в рассмотрение в блочную модель самого простого поворота в виде “точечного” импульсного воздействия типа “центр поворота” [14] привело к “расщеплению” скорости маятниковых волн, т. е. к появлению разных типов маятниковых волн, распространяющихся с разными скоростями. Это позволяет ротационные и маятниковые волны отнести к одному классу явлений — взаимодействию блоков геосреды (вращающейся среды) между собой посредством упругого поля с моментом силы. Возможно, что и используемые при исследовании маятниковых волн методы [20] окажутся полезными при разработке способов регистрации ротационных волн, которые, как и тектонические (деформационные) волны [68], пока выделяются с помощью косвенных, не прямых инструментальных, методов.

Анализ естественных напряжений, выполненный по результатам измерений в рудниках на территории северной Евразии, показал, что весь массив Земной коры, обладая определенной структурой, в каждый момент самоорганизуется, “уходит” от ситуаций с накоплением энергии за счет перестройки структуры и, только исчерпав эти возможности, резко перестраивается и организуется в новую структуру, в “одежде” которой ему будет “легче жить” [11]. Описание такой перестройки осуществляется с помощью маятниковых и ротационных волн. Представляется, что объединение геодинамического и геомеханического способов описания процесса, проводимых в рамках ротационной и маятниковой концепций соответственно, приблизит нас к построению детерминированного прогноза напряженного состояния геосреды [74].

Авторы признательны А.Ф. Ревуженко за обсуждение статьи и выделение в ней наиболее существенных с точки зрения нелинейной геомеханики моментов, что способствовало улучшению статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М.** Фейнмановские лекции по физике. Т. 5. Электричество и магнетизм. — М.: Мир, 1966.
2. **Пейве А. В.** Тектоника и магматизм // Изв. АН СССР. Сер. геол. — 1961. — № 3.
3. **Садовский М. А.** Геофизика и физика взрыва. Избранные труды. — М.: Наука, 2004.
4. **Николаев А. В.** Проблемы нелинейной сейсмологии / Проблемы нелинейной сейсмологии. — М.: Наука, 1987.
5. **Опарин В. Н., Танайно А. С., Юшкин В. Ф.** О дискретных свойствах объектов геосреды и их каноническом представлении // ФТПРПИ. — 2007. — № 3.
6. **Опарин В. Н., Танайно А. С.** Каноническая шкала иерархических представлений в горном породоведении. — Новосибирск: Наука, 2011.
7. **Садовский М. А.** Очерки. Воспоминания. Материалы. — М.: Наука, 2004.
8. **Опарин В. Н., Сашурин А. Д., Кулаков Г. И., Леонтьев А. В., Назаров Л. А. и др.** Современная геодинамика массива горных пород верхней части литосферы: истоки, параметры, воздействие на объекты недропользования. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008.
9. **Курленя М. В., Опарин В. Н.** Проблемы нелинейной геомеханики. Ч. I // ФТПРПИ. — 1999. — № 3.
10. **Курленя М. В., Опарин В. Н.** Проблемы нелинейной геомеханики. Ч. II // ФТПРПИ. — 2000. — № 4.
11. **Леонтьев А. В.** Анализ естественных напряжений по результатам измерений в рудниках на территории Северной Евразии // ФТПРПИ. — 2001. — № 1.
12. **Проблемы и перспективы развития горных наук.** Т. 1. Геомеханика: тр. Междунар. конф. — Новосибирск: ИГД СО РАН, 2005.
13. **Геодинамика и напряженное состояние недр Земли:** тр. науч. конф. с участием иностранных ученых. — Новосибирск: ИГД СО РАН, 2006.
14. **Геодинамика и напряженное состояние недр Земли:** тр. Всерос. конф. Т. 1. — Новосибирск: ИГД СО РАН, 2011.
15. **Опарин В. Н., Востриков В. И., Тапсиев А. И. и др.** О возможных причинах увеличения сейсмической активности шахтных полей рудников “Октябрьский” и “Таймырский” Норильского месторождения в 2003 г. Ч. I: Сейсмический режим // ФТПРПИ. — 2004. — № 4.
16. **Багаев С. Н., Опарин В. Н., Орлов В. А., Панов С. В., Парушкин М. Д.** О волнах маятникового типа и методе их выделения от крупных землетрясений по записям лазерного деформографа // ФТПРПИ. — 2010. — № 3.
17. **Адушкин В. В., Опарин В. Н.** От явления знакопеременной реакции горных пород на динамические воздействия — к волнам маятникового типа в напряженных породах. Ч. I // ФТПРПИ. — 2012. — № 2.
18. **Адушкин В. В., Опарин В. Н.** От явления знакопеременной реакции горных пород на динамические воздействия — к волнам маятникового типа в напряженных породах. Ч. II // ФТПРПИ. — 2013. — № 2.
19. **Опарин В. Н., Сашурин А. Д., Леонтьев А. В. и др.** Деструкция земной коры и процессы самоорганизации в области сильного техногенного воздействия. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012.
20. **Опарин В. Н., Аннин Б. Д., Чугуй Ю. В. и др.** Методы и измерительные приборы для моделирования и натурных исследований нелинейных деформационно-волновых процессов в блочных массивах горных пород. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007.

21. **Опарин В. Н., Багаев С. Н., Маловичко Л. А. и др.** Методы и системы сейсмодеформационного мониторинга техногенных землетрясений и горных ударов. Т. 2. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2010.
22. **Александрова Н. И.** Лекции по теме “Маятниковые волны” в рамках курса “Нелинейная геомеханика”. — Новосибирск: Изд-во ИГД СО РАН, 2012.
23. **Викулин А. В.** Мир вихревых движений. — Петропавловск-Камчатский: КГТУ, 2008.
24. **Веселовский Р. В., Павлов В. Э., Петров П. Ю.** Новые палеомагнитные данные по Анабарскому поднятию и Учуро-Майскому району и их значение для палеогеографии и геологической корреляции рифея Сибирской платформы // Физика Земли. — 2009. — № 7.
25. **Маслов Л. А.** Геодинамика литосферы тихоокеанского подвижного пояса. — Хабаровск; Владивосток: Дальнаука, 1996.
26. **Международный геолого-геофизический атлас Тихого океана.** — М.; СПб: Межправительственная океанографическая комиссия, 2003.
27. **Кузиков С. И., Мухамедиев Ш. А.** Структура поля современных скоростей земной коры в районе Центрально-Азиатской GPS сети // Физика Земли. — 2010. — № 7.
28. **Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.** Механика. Курс теоретической физики. Т. 1. — М.: Наука, 1973.
29. **Пономарев В. С.** Энергонасыщенность геологической среды: тр. Геол. ин-та РАН. Вып. 582. — М.: Наука, 2008.
30. **Седов Л. И.** Механика сплошной среды. Т. 1. — М.: Наука, 1973.
31. **Леонов М. Г.** Тектоника консолидированной коры / Тр. Геол. ин-та РАН. Вып. 575. — М.: Наука, 2008.
32. **Викулин А. В., Иванчин А. Г.** Модель сейсмического процесса // Вычисл. технологии. — 1997. — Т. 2. — № 2.
33. **Викулин А. В., Иванчин А. Г.** Ротационная модель сейсмического процесса // Тихоокеанская геология. — 1998. — Т. 17. — № 6.
34. **Панин В. Е.** Основы физической мезомеханики // Физ. мезомеханика. — 1998. — № 1.
35. **Викулин А. В.** Сейсмичность. Вулканизм. Геодинамика: сб. тр. — Петропавловск-Камчатский: КамГУ, 2011.
36. **Викулин А. В., Иванчин А. Г., Тверитинова Т. Ю.** Моментная вихревая геодинамика // Вестн. МГУ. Сер. 4. Геология. — 2011. — Т. 66. — № 1.
37. **Касахара К.** Механика землетрясений. — М.: Мир, 1985.
38. **Викулин А. В., Водинчар Г. М., Гусяков В. К. и др.** Миграция сейсмической и вулканической активности в зонах напряженного состояния вещества наиболее геодинамически активных мегаструктур Земли // Вестн. КГТУ. — 2011. — Вып. 17.
39. **Прозоров А. Г.** О пониженной вероятности сильных толчков в некоторой пространственно-временной окрестности сильных землетрясений мира // Вопросы прогноза землетрясений и строения Земли. Вычислительная сейсмология. Вып. 11. — М.: Наука, 1978.
40. **Николаевский В. Н.** Геомеханика и флюидодинамика. — М.: Недра, 1996.
41. **Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.** Теория упругости. Курс теоретической физики. Т. VII. — М.: Наука, 2003.
42. **Викулин А.В., Быков В.Г., Лунева М.Н.** Нелинейные волны деформации в ротационной модели сейсмического процесса // Вычисл. технологии. — 2000. — Т. 5. — № 1.

43. **Давыдов А. С.** Солитоны в квазиодномерных молекулярных структурах // Успехи физ. наук. — 1982. — Т. 138. — Вып. 4.
44. **Викулин А. В.** Физика Земли и геодинамика: учеб. пособие. — Петропавловск-Камчатский: КамГУ, 2009.
45. **Гапонов-Грехов А. В., Рабинович М. И.** Л. И. Мандельштам и современная теория нелинейных колебаний и волн // Успехи физ. наук. — 1979. — Т. 128. — Вып. 4.
46. **Викулин А. В.** Энергия и момент силы упругого ротационного поля геофизической среды // Геология и геофизика. — 2008. — Т. 49. — № 6.
47. **Викулин А. В.** Новый тип упругих ротационных волн в геосреде и вихревая геодинамика // Геодинамика и тектонофизика. — 2010. — Т. 1. — № 2.
48. **Каррыев Б. С.** Вот произошло землетрясение. — SIBIS. 2009. <http://www.publication.ru>.
49. **Кузнецов В. В.** Ударно-волновая модель землетрясения. I. Сильные движения землетрясения как выход ударной волны на поверхность // Физ. мезомеханика. — 2009. — Т. 12. — № 6.
50. **Слезняк О. И.** Вихревые системы литосферы и структуры докембрия. — Киев: Наук. думка, 1972.
51. **Бороздич Э. В.** Короткоживущие подкоровые локальные возмущения (КПЛВ). Их природа и проявления // Исследования в России. Электронный журн. — 2008. <http://zhurnal.apl.relarn.ru/articles/2008/049.pdf>.
52. **Борисенков Е. П., Пасецкий В. М.** Тысячелетняя летопись необычайных явлений природы. — М.: Мысль, 1988.
53. **Попков В. И., Фоменко В. А., Глазырин Е. А., Попов И. В.** Катастрофическое тектоническое событие лета 2011 г. на Таманском полуострове // ДАН. — 2013. — Т. 448. — № 6.
54. **Геологический словарь.** Т. 2. — М.: Недра, 1978.
55. **Carey S.W.** The Rheid concept in geotectonics, Bull. Geol. Soc. Austral, 1954, Vol. 1.
56. **Жарков В. Н.** Внутренне строение Земли и планет. — М.: Наука, 1983.
57. **Займан Дж.** Принципы теории твердого тела. — М.: Мир, 1974.
58. **Викулин А. В., Кролевец А. Н.** Чандлеровское колебание полюса и сеймотектонический процесс // Геология и геофизика. — 2001. — Т. 42. — № 6.
59. **Гарагаш И. А., Николаевский В. Н.** Механика Коссера для наук о Земле // Вычисл. механика сплошных сред. — 2009. — Т. 2. — № 4.
60. **Арсеньев С. А., Бабкин В. А., Губарь А. Ю. и др.** Теория мезомасштабной турбулентности. Вихри атмосферы и океана. — М.; Ижевск: Институт компьютерных исследований, НИЦ “Регулярная и хаотическая динамика”, 2010.
61. **Ерофеев В. И.** Братья Коссера и механика обобщенных континуумов // Вычисл. механика сплошных сред. — 2009. — Т. 2. — № 4.
62. **Новацкий В.** Теория упругости. — М.: Мир, 1975.
63. **Хирт Дж., Лоте И.** Теория дислокаций. — М.: Атомиздат, 1972.
64. **Антонов В. А., Кондратьев Б. П.** О невозможности существования упруго-вязкоупругих волн, распространяющихся вдоль литосферного разлома // Физика Земли. — 2008. — № 6.
65. **Викулин А. В., Мелекесцев И. В., Акманова Д. Р., Иванчин А. Г. и др.** Информационно-вычислительная система моделирования сейсмического и вулканического процессов как основа изучения волновых геодинамических явлений // Вычисл. технологии. — 2012. — Т. 17. — № 3.
66. **Vikulin A. V., Akmanova D. R., Vikulina S. A., Dolgaya A. A.** Migration of seismic and volcanic activity as display of wave geodynamic process, Geodynamics&Tectonophysics, 2012, Vol. 3, No. 1. DOI:10.5800/GT-2012-3-1-0058.

67. **Vikulin A. V., Tveritina T. Yu., Ivanchin A. G.** Wave moment geodynamics, *Acta Geophysica*, 2013, Vol. 61, o.N 2. DOI: 10.2478/s11600-012-0079-8.
68. **Быков В. Г.** Деформационные волны Земли: концепция, наблюдения и модели // *Геология и геофизика*. — 2005. — Т. 46. — № 11.
69. **Хаин В. Е., Халилов Э. Н.** Цикличность геодинамических процессов: ее возможная природа. — М.: Науч. мир, 2009.
70. **Мясников В. П., Гузев М. А.** Неевклидова модель деформирования материалов на различных структурных уровнях // *Физ. мезомеханика*. — 2000. — № 3.
71. **Ревуженко А. Ф.** Математический анализ функций неархимедовой переменной. — Новосибирск: Наука, 2012.
72. **Опарин В. Н., Востриков В. И.** Энергетический критерий объемного разрушения очаговых зон и волны маятникового типа / *Методы и системы сейсмодеформационного мониторинга техногенных землетрясений и горных ударов. Т. 2: интеграционные проекты. Вып. 25 / ред. Н. Н. Мельников*. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2010.
73. **Опарин В. Н., Симонов Б. Ф., Юшкин В. Ф., и др.** Геомеханические и технические основы увеличения нефтеотдачи пластов в виброволновых технологиях. — Новосибирск: Наука, 2010.
74. **Викулин А. В.** Ротация и прогноз напряженного состояния недр Земли // *Геодинамика и напряженное состояние недр Земли: тр. междунар. конф. / ред. А. В. Леонтьев*. — Новосибирск: ИГД СО РАН, 2004.

Поступила в редакцию 17/II 2013