

УДК 550.34+551.24

А.В. Викулин<sup>1</sup>, А.Г. Иванчин<sup>2</sup>, Т.Ю. Тверитинова<sup>3</sup>

## МОМЕНТНАЯ ВИХРЕВАЯ ГЕОДИНАМИКА

Представлен обзор естественнонаучных представлений о вращательном движении материи и ее «кусковатом» строении. Анализ миграции очагов землетрясений и перемещения участков границ тектонических плит позволил выявить у таких движений общие свойства и обосновать их волновую природу, для описания которой построена и аналитически решена принципиально новая модель — ротационная. Показано, что в рамках ротационной модели блоки и плиты взаимосвязаны упругими дальнедействующими полями, формирующими единое планетарное геодинамическое поле — «самосогласованное» состояние геосреды. Предложено использовать геодинамические решения ротационной модели, объединяющие гидродинамические течения в задаче Дирихле—Дедекинда—Римана о равновесной форме Земли с геологическими и геофизическими вихревыми структурами и движениями в один класс явлений, в качестве основы при построении новой геологической парадигмы — новой моментной (и/или волновой и/или вихревой) геодинамики.

*Ключевые слова:* вихревая геодинамика, ротационная модель.

The work presents the review of natural-science representations about the rotary motion of matter and its piecewise structure. At the present time, we observe the next increase of interest to a problem of the history of natural sciences, and it occurs in sciences about the Earth. In 1920 s, the Chinese geologist Lee J.S. lays the foundation for vortical geodynamics. In second half of the XX th century, geologists O.I. Slenzak and I.V. Melekestsev developed the representations of Lee J.S. Geologist A.V. Pejve, mechanic L.I. Sedov and physicist M.A. Sadovsky offered the concept of block structures of geo-environment and proved the possibility of movement of composing it blocks under influence of own moments.

The analysis of both migration of the earthquakes sources and movement of sections of tectonic plates' borders has allowed to reveal the general properties of such movements and to prove their wave nature, for which description the essentially new rotational model was constructed and analytically solved. It is shown that within the limits of rotational model blocks and plates are interconnected among themselves by the elastic long-range fields forming an uniform planetary geodynamic field — the self-consistent condition of geo-environment. It is offered to use the geodynamic decisions of rotational model that merge hydrodynamic currents in a problem of Dirihle—Dedekind—Riman about the equilibrium form of the Earth with the both geological and geophysical vortical structures and movements in the one class of phenomena as a basis at the construction of a new geological paradigm — new moment (and/or wave and/or vortical) geodynamics.

*Key words:* vortical geodynamics, rotational model.

**Введение.** Факт цикличности происходящих на Земле глобальных процессов, их пульсаций и перестроек (Дж. Геттон, Э. Ог, М. Бертран, Г. Штилле, Е.Е. Милановский, Ю.И. Тверитинов и др.) уже не является предметом споров специалистов, основной акцент сместился к вопросам о их природе и причинах. Не вызывает сомнений и влияние ротации Земли на ее глубинную структуру (Дж. Геттон, Дж. Плейфер, Ч. Лайель, У. Гершель, В.Е. Хаин, Э.Н. Халилов и др.), на деформацию земной коры (М. Стюарт и др.) и самоорганизацию геологической среды (А.В. Лукьянов).

В последнее десятилетие [Спорные..., 2002; Пушаровский, 2005] резко усилился интерес к вихревым геологическим структурам [Вихри..., 2004; Мирлин, 2009; Ротационные..., 2007]. Очевиден поиск новой тектонической парадигмы, в основу которой заложен

принцип перехода от «линейки» к «циркулю», связанный с моментной природой геологической среды [Викулин, 2009; Викулин, Тверитинова, 2007, 2008].

Тектонофизика полагает все физические явления внутри Земли и на ее поверхности установленными и известными [Гзовский, 1975; Гончаров и др., 2005], что вступает в глубокое противоречие с имеющимися данными. По этой причине физика Земли в последние десятилетия «прирастала» геодинамикой [Викулин, 2009, с. 3–5]. В таких условиях исследование геопроцессов необходимо проводить на новом качественном уровне.

Все эти данные указывают на необходимость разработки новой геологической парадигмы. Постановка вопроса в такой плоскости есть результат наших предыдущих исследований [Викулин, 2008; Викулин, Иванчин, 1998; Викулин, Тверитинова, 2007, 2008].

<sup>1</sup> Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, вед. науч. с., докт. физ.-мат. н., e-mail: vik@kscnet.ru

<sup>2</sup> Торговый дом «Музыка», Томск, директор науч. отдела, канд. физ.-мат. н., e-mail: ivanchin@tdm.su

<sup>3</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геологии России, доцент, канд. геол.-мин. н., e-mail: tvertat@geol.msu.ru

**Исходные данные. Теоретическое осмысление вращательного движения.** Первая (вращательная) вихревая количественная (после качественных античных) модель строения мира предложена в конце XVIII в. П. Лапласом. В середине XIX в. получены важные гидродинамические результаты (Г.Л. Гельмгольц, Г.Р. Кирхгоф и др.) и создана вихревая теория материи (Дж. Томсон, Кельвин и др.).

Революционный вклад в основы теории фигур равновесия внесли в середине XIX в. математики П. Дирихле и Б. Риман. Они впервые рассмотрели стационарные фигуры равновесия вращающихся гравитирующих тел и открыли класс двухпараметрических равновесных эллипсоидов — эллипсоидов Римана [Кондратьев, 2003; Викулин, 2009, с. 411–415].

*Началом «вихревого» этапа в геологии* можно считать выход в свет работы китайского геолога Ли Сыгуана [Lee, 1928; Ли Сыгуан, 1958], в которой впервые выделены и описаны «вихревые структуры» (термин Ли Сыгуана) в геологических разрезах Китая. В результате повторных геодезических работ японскими исследователями [Fujiwhara et al., 1933] впервые сделан вывод о вращательном движении блоков земной коры.

М.В. Стюарт в конце 1950-х гг. обратил внимание на то, что изменение угловой скорости вращения Земли обуславливает изменение ее полярного сжатия и служит причиной особого напряженного состояния в широтных зонах между 30 и 40° в обоих полушариях.

*«Блоковая» волновая тектоника.* А.В. Пейве обосновал блоковое строение земной коры и новый механизм движения — собственный источник движения блока [Пейве, 1961]. Тектонофизическими исследованиями установлена пространственная волнистость крупных тектонических разрывов [Гзовский, 1975] — при определенной скорости развития трещины происходит ее закручивание [Белоусов, Гзовский, 1954; Магницкий, 2006]. В. Эльзассером [Elsasser, 1969] построена первая механическая модель, допускающая решение в виде медленных тектонических волн. Л.И. Седов [1973, с. 146–148] обратил внимание на важность механических задач с собственным моментом количества движения макроскопических по размерам объемов вещества. Т. Рикитаке [Рикитаке, 1970] привел данные высокоточных геодезических измерений 1-го класса, которые показали, что о. Хонсю является, по сути, совокупностью соприкасающихся вихревых (по Ли Сыгуану) структур.

О.И. Слензак [Слензак, 1972] развил представления Ли Сыгуана о вихревых геологических структурах на новом качественном уровне. В результате проведенных им в 1950–1970 гг. исследований доказано существование крупных (диаметр до 1000 км и более) вихревых структур и сделан вывод о ее самостоятельности как типе тектонической структуры литосферы, который не может быть создан внешними источниками движения в виде дрейфующих матери-

ков или смещений по планетарным разломам». По О.И. Слензаку, породы, слагающие вихревые структуры, образовались в твердом состоянии на месте и за счет вещества верхней мантии и с самого начала формировались как дугообразные, а не механически изгибались из первоначально прямолинейных структур. Системы вихревых образований связаны в единую иерархическую тектоническую планетарную структуру.

*Блоковые модели геофизической среды.* М.А. Садовский в 1979 г. установил блоковый («кусковатый») характер геофизической среды и совместно с сотрудниками разработал ее модель [Садовский, 2004]. И.В. Мелекесцевым предложена вихревая вулканическая гипотеза и рассмотрены некоторые ее следствия; в частности, показано вращение Исландии по часовой стрелке со скоростью  $5 \cdot 10^{-4}$  град/год [Мелекесцев, 1979]. В атласе [Международный..., 2003] на основании данных многолетних детальных инструментальных исследований различных геофизических полей показано, что расположенные в юго-западной части Тихого океана плиты Пасха и Хуан-Фернандос (их размеры в поперечнике составляют 300–400 км) вращаются. Плита Пасха за 5 млн лет повернулась почти на 90°, что соответствует скорости ее вращения около  $10^{-5}$  град/год. Изолинии всех геофизических полей, отражающих поворотное движение этих плит, представлены спиральными линиями. На основании геофизических и геологических данных сформулирован вывод о вращательном движении блоков земной коры, являвшихся и очагами землетрясений (см. обзор в [Викулин, 2003, 2009]).

*Волновые ротационно-вихревые модели нелинейных геосред.* В работе А.Н. Дмитриевского, И.А. Володина, Г.И. Шипова [1993] предложен принципиально новый подход к изучению физики Земли и геодинамики. Эти авторы вводят понятие «системное движение материи», базирующееся на новой теории вакуума и поля инерции. В рамках таких представлений характерные движения геологической и геофизической сред приводят к различным типам вихревых и винтовых структур. Экспериментальное обнаружение признаков существования уединенных деформационных волн в геофизических полях послужило В.Н. Николаевскому [1996] основой для построения математической волновой модели поворотных движений блоков горной породы. В обобщающей работе В.Г. Быкова [2005] приведен обзор волновых тектонических исследований, представлены основные сведения о параметрах и источниках нелинейности горных пород и рассмотрены нелинейные волновые процессы на разных структурных уровнях геологических объектов.

*Начало нового этапа развития понятий вихревой геодинамики.* 23 марта 2003 г. в Институте вулканической геологии и геохимии ДВО РАН (ныне Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН) в Петропавловске-Камчатском состоялся первый тематический научный семинар, на котором вихревые гео-

логические движения были рассмотрены в комплексе с физическими, геофизическими, географическими и другими данными и явлениями [Вихри..., 2004]. В том же году вышел в свет заключительный сборник серии из 7 книг (1977–2003) под общей редакцией А.В. Николаева [Проблемы..., 2003]. Во всех сборниках на большом экспериментальном и теоретическом материале показано, что геофизическая среда является сильнонелинейной, самоорганизованной и даже «живой». В 2007 г. вышел в свет тематический сборник [Ротационные..., 2007], где вихревые движения рассмотрены широко, в том числе впервые предложено использовать вихревые геодинамические движения и их особенности в качестве основы для новой парадигмы геологии.

**Два типа взаимодействия блоков геосреды.** Явление миграции очагов землетрясений — их закономерное распределение в пространстве и во времени — не вызывает сомнений, неясной остается природа миграции [Быков, 2005]. Наличие такого рода закономерностей физически равносильно утверждению о существовании взаимодействия между очагами землетрясений [Викулин, 1990, 2008].

Закономерности миграции очагов землетрясений в настоящее время хорошо исследованы [Викулин, 2003, 2009; Викулин, Иванчин, 1998]. Все данные о скорости миграции очагов тихоокеанских землетрясений в осях скорость миграции ( $V$ ) — магнитуда землетрясения ( $M$ ) представлены на рис. 1, где видно, что все поле скорости разбито на два поля точек. Одно из них (I) соответствует глобальной миграции очагов землетрясений вдоль всей окраины Тихого океана:

$$M_1 \approx 2 \ln V_1, V_{1,\max} = 1 \div 10 \text{ см/с}, M_{1,\max} \approx 9. \quad (1)$$

Второе поле (II) отвечает локальной миграции форшоков и афтершоков в очагах землетрясений:

$$M_2 \approx \ln V_2, V_{2,\max} = V_S \approx 4 \text{ км/с}, M_{2,\max} \approx 8,0 \div 8,5, \quad (2)$$

где  $V_{1,\max}$ ,  $V_{2,\max}$  — максимальные значения скорости миграции в областях предельных значений магнитуды  $M_{1,\max}$  и  $M_{2,\max}$  соответственно, известные как скорость крипа и поперечная сейсмическая волна  $V_S$ . При переходе от магнитуды землетрясения ( $M$ ) к размеру его очага ( $L$ ) и сброшенной энергии ( $E$ ) из первых уравнений в системах (1) и (2) получаем блоковые («корпускулярные») и «энергетические»

$$\ln L_1 \approx 0,8 \lg V_1, \ln L_2 \approx 0,4 \lg V_2 \quad (3.1-3.2)$$

и «энергетические»

$$E_1 \approx V_1^{3,6} \approx V_1^4, E_2 \approx V_2^{1,8} \approx V_2^2 \quad (4.1-4.2)$$

представления взаимодействия между очагами землетрясений.

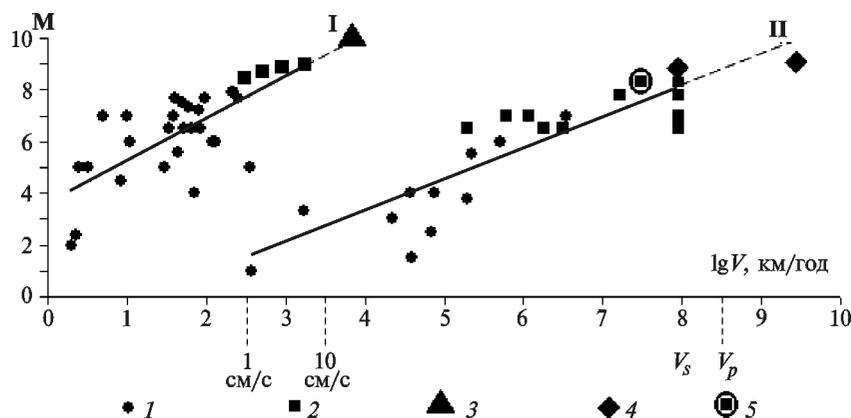


Рис. 1. Значения скорости миграции тихоокеанских землетрясений и определенные по ним зависимости  $M$  ( $\lg V$ ) [Викулин, 2009, с. 296]: 1 — данные, полученные ранее [Викулин, 2003; Викулин, Иванчин, 1998]; 2–5 — более поздние данные, полученные в работе [Викулин, 2009]; 3 — скорость миграции сильнейших землетрясений-дуплетов с  $M_W=8,1 \div 8,7$  в 1897–1901 гг. вдоль окраины Тихого океана; 4 — скорость миграции толчков в дуплетах 04.11.1952, Камчатка,  $M_W=9,0$  и 13.11.1963 Курилы,  $M_W=8,7$ ; 5 — скорость миграции, соответствующая максимальному значению магнитуды форшока  $M=8,3$ , который за 40 с предварил основную толчок Чилийского землетрясения 1960 г.,  $M=8,3$ ,  $M_W=9,5$ ;  $V_p \approx 8$  км/с и  $V_S \approx 4$  км/с — продольная и поперечная сейсмические скорости соответственно. I и II — зависимости магнитуды от скорости «глобальной миграции» вдоль окраины Тихого океана  $M_1$  ( $\lg V_1$ ) и скорости «локальной» миграции форшоков и афтершоков в очагах сильных землетрясений  $M_2$  ( $\lg V_2$ ) соответственно

Исследование форшоков и афтершоков в очагах больших землетрясений показало, что скорость их миграции в направлении с запада на восток превышает такую с востока на запад на величину, равную эффекту Доплера, связанному с вращением Земли вокруг своей оси [Викулин, 2009, с. 297–302; Викулин, Викулина, 2007]. Таким образом, миграция очагов землетрясений по сути — волновой процесс.

Анализ данных о размерах плит и скорости движения их границ за последние 150 млн лет позволил выявить две статистически значимые зависимости [Викулин, Тверитинова, 2007]:

$$\ln L_1 \text{ [км]} (\pm 0,33) \approx (0,7 \pm 0,3) \ln V_1 \text{ [мм/год]}, \quad 5 < \tau_2 \leq 100 \text{ млн лет} \quad (5.1)$$

$$\ln L_2 \text{ [км]} (\pm 0,3) \approx (0,43 \pm 0,15) \ln V_2 \text{ [мм/год]}, \quad 5 < \tau_1 \leq 5 \text{ млн лет}, \quad (5.2)$$

где  $\tau_{1,2}$  — значения продолжительности, определенные по номерам магнитных аномалий в соответствии с данными работ [Харленд и др., 1985; Хейцлер и др., 1974] об «относительных» интервалах времени, по которым устанавливали зависимости (5.1) и (5.2). Корреляционная зависимость  $\ln L \approx \lg V$ , близкая соотношению (5.1), для процессов спрединга и субдукции получена в работах [Айзекс и др., 1974; Жарков, 1983; Морган, 1974]. Зависимость  $V \approx L^3$  или  $\ln L \approx 0,33 \cdot \ln V$ , определяющая самосогласованную активизацию разломов Центральной Азии и близкая соотношению (5.2), — в работе [Шерман, Горбунова, 2008].

Отметим, что сейсмические (3.1) и (3.2) и тектонические (5.1) и (5.2) зависимости схожи [Викулин, Тверитинова, 2007].

**Модель движения геосреды. Постановка задачи.** Геофизическая (М.А. Садовского) и геологическая (А.В. Пейве) среды являются вращающимися. Значение и направление угловой скорости не зависят от выбора положения начала координат, к которому можно отнести вращение тела. Поэтому можно говорить об угловой скорости вращения тела без указания на это начало, что в принципе позволяет макроскопические по размерам геофизические блоки и геологические плиты считать объемами с собственными моментами, а их совокупность — геосредой, как ее понимали А.В. Пейве [1961] и М.А. Садовский [2004]. Величины моментов блоков и плит в такой среде, очевидно, не должны зависеть от их размеров [Викулин, 2009, с. 311].

Смысл, который мы вкладываем в понятие «собственный момент блока», наиболее близок «собственному моменту количества движения конечного объема сплошной среды» по Л.И. Седову [1973, с. 146–148, 504–530]. Наш подход, когда упругое поле вокруг макрообъема (блока и плиты) «наследует» его собственный момент (циркуляцию), в принципе отличается от подходов других авторов, которые либо не учитывают вращение Земли [Курленя, Опарин, 2000; Гольдин, 2003], либо учитывают формально, в рамках моментной теории упругости [Николаевский, 1996; Быков, 2005]. Отличие нашей модели от континуума Коссера заключается в следующем: блоки и плиты не просто имеют ротационные степени свободы, они имеют собственные моменты, которые в случае вращающейся среды (геосреды) приводят к ряду специфических следствий [Викулин, 2003, 2008, 2009; Викулин, Иванчин, 1998; Викулин, Тверитинова, 2007, 2008].

**Решение задачи упругого поля вокруг одного блока.** Определялось поле упругих напряжений, возникающее в бесконечной среде, вращающейся с угловой скоростью  $\Omega$  вокруг блока шаровой формы радиуса  $R_0$ , как решение уравнения упругого равновесия в области  $r \geq R_0$  с нулевыми граничными условиями на бесконечности, с действующей на блок силой, равной нулю, и моментом силы, не зависящим от размера блока  $R_0$ . Аналитически полученное решение задачи для момента силы упругого поля  $K$ , направленного перпендикулярно плоскости его поворота, и величины упругой энергии поля  $W$  записывается в виде

$$K = -6\pi^2 \Omega R_0^4 \sqrt{\frac{\rho}{15G}} \sin \beta / 2, \quad (6.1)$$

$$W = \frac{16}{15} \pi \rho \Omega^2 R_0^5 \sin^2 \beta / 2. \quad (6.2)$$

При параметрах модели: плотность среды  $\rho = 3 \text{ г/см}^3$ , модуль ее сдвига  $G = 10^{11} \text{ Н/м}^2$ , угловой скорости вращения Земли вокруг своей оси  $\Omega = 7,3 \cdot 10^{-5} \text{ рад/с}$  и размере блока  $R_0 = 100 \text{ км}$ , соответствующего очагу землетрясения с магнитудой  $M \approx 8$ , из соотношений (6.1–6.2) получаем  $K \approx 10^{28+30} \text{ дин}\cdot\text{см}$  и  $W \approx 10^{16+18} \text{ Дж}$ ,

которые по порядку величины близки реально регистрируемым при землетрясениях с  $M \approx 8$  сейсмическому моменту и выделившейся упругой энергии соответственно. Эти значения достигаются при угле поворота блока (очага землетрясения)  $\beta \approx 10^{-4} \text{ рад}$ . При продолжительности сейсмического цикла (повторяемость сильнейших землетрясений в одном месте) 100–1000 лет для скорости поворота блока получаем модельную оценку угла поворота, равную  $\beta \approx 10^{-(4+6)} \text{ град/год}$ , которая близка к скорости поворота блоков и плит [Зоненшайн, Савостин, 1979; Международный..., 2003; Мухамедиев и др., 2006].

**Два блока. Дальнейшее действие.** Упругая энергия вокруг двух поворачивающихся блоков равна

$$W = G \int (a+b)^2 dV = G \left( \int a^2 dV + \int b^2 dV + 2 \int abdV \right),$$

где  $a$  и  $b$  — тензоры упругой деформации, создаваемые в результате поворота первого и второго блока соответственно, интегрирование проводится по всему объему тела. Первые два слагаемых в правой части в выражении для упругой энергии есть собственные упругие энергии, каждая из них вычисляется на основании (6.2). Третье слагаемое определяет выражение для энергии взаимодействия первого и второго блоков

$$W_{\text{int}} = 2G \int abdV.$$

Выражение для энергии взаимодействия  $W_{\text{int}}$  и соответствующего ей  $K_{\text{int}}$  получено в виде

$$W_{\text{int}} = \frac{3}{2} \pi \rho \Omega^2 R_{01}^4 R_{02}^4 l^{-3} \cos \phi, \quad (7.1)$$

$$K_{\text{int}} = -\frac{3}{2} \pi \rho \Omega^2 R_{01}^4 R_{02}^4 l^{-3} \sin \phi, \quad (7.2)$$

где  $R_{01}$  и  $R_{02}$  — характерные размеры блоков,  $l$  — расстояние между их центрами,  $\phi$  — угол между их моментами сил.

В случае равновеликих блоков получаем

$$\frac{K_{\text{int}}}{K} = \frac{\Omega R_0}{V_S} \left( \frac{R_0}{l} \right)^3 \frac{\sin \phi}{\sin \beta / 2} \approx \frac{V_R}{V_S}, \quad (8.1)$$

$$\frac{W_{\text{int}}}{W} = \frac{45}{32} \left( \frac{R_0}{l} \right)^3 \frac{\cos \phi}{\sin^2 \beta / 2} = \delta, \quad (8.2)$$

где  $V_S = \sqrt{G/\rho}$  и  $V_R = \Omega R_0$  — скорость поперечной сейсмической волны и центробежной соответственно. Из (8.1) видно, что инерционные моментные эффекты взаимодействия, связанные с поворотом блоков внутри вращающегося тела, становятся тем существеннее, чем с большей скоростью вращается тело и чем больше размер блока или магнитуда землетрясения. Из (8.2) видно, что максимальное ( $\cos \phi = 1$ ) расстояние  $\Lambda$ , на котором энергия взаимодействия  $W_{\text{int}}$  будет по порядку величины близка собственной энергии ( $W$ ) блока ( $\delta = 1$ ), определится из выражения

$$\Lambda \approx 2\beta^{-2/3}R_0 \approx (10^2 \div 10^3)R_0, \quad (9)$$

в котором значение угла поворота было принято равным  $\beta \approx 10^{-4}$  рад.

Из соотношения (9) видно, что упругие деформации с моментом поля внутри блоковых вращающихся тел распространяются на расстояние, которое на 2–3 порядка превышает размеры блоков; другими словами, такие поля являются дальнедействующими.

**Цепочка блоков.** Уравнение движения для блока с координатой  $x$  (вдоль цепочки) в момент времени  $t$  можно записать в виде

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial \xi^2} - \frac{\partial^2 \theta}{\partial \eta^2} = \sin \theta, \quad (10)$$

где  $\theta = \beta/2$ ,  $\xi = k_0 x$ ,  $\eta = c_0 k_0 t$  — безразмерные координаты. Волновое число  $k_0$  и скорость  $c_0$  определяются из следующих соотношений:

$$k_0^2 = \frac{3\pi\Omega}{wV} \left( \frac{3V}{4\pi} \right)^{4/3} \sqrt{\frac{\rho G}{15}}, \quad c_0^2 = \frac{wV}{I}, \quad (11)$$

где  $V = 4/3\pi R_0^3$  — объем блока,  $I = 8/15\pi\rho R_0^5$  — его момент инерции и  $w$  — линейная плотность сейсмической энергии, выделяющейся в цепочке.

Уравнение (10) известно как уравнение синус-Гордона (СГ). Такого рода уравнения достаточно широко используются при решении разных геодинамических задач [Быков, 2005; Проблемы..., 2003].

**Волновые решения уравнения СГ.** Уравнение (10) имеет много решений, среди них в технических, физических и геофизических приложениях часто встречаются решения в виде локализованных (уединенных) волн — солитонов (soliton) [Быков, 2005]. В длинной цепочке блоков, когда можно не учитывать влияние ее концов (каковыми являются и сейсмические пояса планеты, в том числе Тихоокеанское кольцо), возможны решения, получившие название экситонов (exiton) [Давыдов, 1982]. Качественные зависимости энергии возбуждения ( $E$ ) от скорости распространения ( $V$ ) солитонов (*sol*, I) и экситонов (*ex*, II) приведены на рис. 2 и записываются в виде

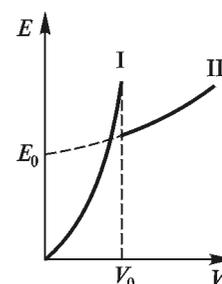
$$E_{sol} \approx V_{sol}^n, \quad E_{sol} \geq 0, \quad V_{sol} \leq V_0, \quad (12.1)$$

$$E_{ex} \approx V_{ex}^p, \quad V_{ex} > V_0, \quad n > p, \quad (12.2)$$

где  $V_0$  — характерная скорость процесса, протекающего в цепочке взаимодействующих блоков [Давыдов, 1982].

**Характерная скорость сейсмического процесса.** По аналогии с обычными упругими волнами (случай тектонического приближения [Николаевский, 1996]), считая, что длина волны экситона  $\Lambda_0$  равна размеру сейсмофокального блока ( $\Lambda_0 \approx R_0$ ,  $k_0 \approx 2\pi/R_0$ ), для значения характерной скорости волнового процесса в цепочке взаимодействующих блоков  $c_0$  из (11) получаем следующее теоретическое модельное выражение:

Рис. 2. Волновые решения уравнения СГ: I — солитоны, II — экситоны,  $V_0$  — характерная скорость процесса как предельная скорость солитонного решения;  $E_0 > 0$  — минимальная энергия солитонного возбуждения [Давыдов, 1982]



$$c_0^2 = \frac{3\sqrt{15}}{8\pi^2} \Omega R_0 \sqrt{\frac{G}{\rho}} \approx V_R V_S, \quad (13)$$

или, при принятых выше параметрах модели,

$$c_0 \approx (1 \div 10) \text{ см/с}. \quad (14)$$

Соотношение «наклонов» миграционных глобальной (3.1), (4.1) и локальной (3.2) и (4.2) зависимостей (рис. 1, I и II соответственно) не противоречит таким же теоретическим «наклонам» солитонной (12.1) и экситонной (12.2) зависимостей (рис. 2, I и II соответственно). Модельное значение скорости  $c_0$  в соответствии с (13), (14) равно миграционной предельной скорости глобальной миграции очагов тихоокеанских землетрясений  $V_{1,max}$  (1) и, таким образом, по сути является характерной скоростью процесса  $V_0$  (12.1–12.2):

$$c_0 \approx V_{1,max} \approx V_0. \quad (15)$$

В совокупности это позволяет глобальную и локальную зависимости магнитуды и энергии землетрясений от скорости миграции их очагов (1)–(4) считать, по А.С. Давыдову [1982], солитонным (12.1) и экситонным (12.2) решениями уравнения СГ (10)–(11), описывающего движение цепочки поворачивающихся геоблоков.

Характерную скорость процесса (13), (15) с точностью до численного множителя можно представить в виде среднегеометрического произведения значений центробежной ( $V_R$ ) и упругой ( $V_S$ ) скорости. Отсюда и название модели, данное ей авторами [Викулин, Иванчин, 1998], — ротационно-упругая волновая модель.

**Движение плит.** «Прямая» задача расчета поля напряжений вокруг тонких плит, движущихся по поверхности шара под действием собственных моментов, не решалась вследствие очевидных трудностей математического характера. Однако из геодинамической сути задачи следует, что поля напряжений вокруг тектонических плит по физическим свойствам не должны отличаться от таких же полей вокруг геофизических блоков. Подтверждением тому служит отмеченная выше близость сейсмических закономерностей (3.1–3.2) тектоническим (5.1–5.2): фактически последние являются продолжениями сейсмических закономерностей в область меньшей по значению тектонической скорости. Показано [Викулин, Тверитинова, 2007], что «энергетика» тектонических зако-

номерностей (5.1–5.2), «опирающихся» на механизм планетарного вихря, определяется соотношениями

$$E_1 \approx V_1^5, E_2 \approx V_2^2, \quad (16.1–16.2)$$

которые близки соответствующим сейсмическим энергетическим равенствам (4.1–4.2).

Таким образом, близость блоковых (3.1–3.2) и энергетических (4.1–4.2) сейсмических соотношений таким же плитовым (5.1–5.2) и энергетическим (16.1–16.2) тектоническим соотношениям, полученным в собственно моментном приближении, показывает, что ротационная волновая модель описывает всю совокупность взаимодействующих геофизических блоков и тектонических плит на Земле. Другими словами, ротационная волновая модель описывает сеймотектонический планетарный процесс. Представляется, что в рамках таких представлений окажется возможно объяснить большую (несколько сотен километров) амплитуду колебаний окраины Тихого океана в последние 40 млн лет [Маслов, 1996, с. 160].

**Вихревые моментные движения как основа новой парадигмы геологии.** Земля и ее фигура постоянно стремятся к состоянию равновесия. В течение всей истории Земли на ней имели место активные вулканизм, сейсмичность и тектоника — главные геодинамические процессы, в том числе определявшие и фигуру Земли. Такие процессы в течение всей истории Земли проявлялись в виде разнообразных по природе, но единых по сути циклонических движений в атмосфере и гидросфере и вихревых структур в твердой Земле.

В соответствии с задачей Дирихле и ее решениями Дедекинда—Римана равновесная эллипсоидальная форма вращающейся гравитирующей капли обеспечивается вихревыми течениями, возникающими внутри капли и на ее поверхности [Кондратьев, 2003]. Землю на больших (геологических) временных интервалах можно рассматривать как «жидкое» тело. Поэтому существующие в атмосфере и гидросфере Земли и на ее «твердой» поверхности вихревые движения можно рассматривать как течения, которые соответствуют

решениям задачи Дирихле—Дедекинда—Римана. К такому же классу решений можно отнести и описанные выше сеймотектонические волны.

Таким образом, блоковая вращающаяся геосреда Пейве—Седова—Садовского и полученные нами для нее волновые упруго-ротационные решения можно рассматривать в качестве основы такой концепции, в рамках которой аналитически можно описать геодинамический процесс.

Основное отличие предложенной нами моментной (волновой, вихревой) геодинамики от глобальной тектоники [Новая..., 1974] заключается в следующем. Стремление вращающейся Земли к равновесной эллипсоидальной фигуре и возможность существования вихревых движений Дирихле—Дедекинда—Римана «включает» основной движитель волновой геодинамики — моментный механизм вращения ее «элементарных» объемов. Тем самым генерируется планетарное (самоорганизованное) упругое поле, в котором взаимодействие плит и блоков и как следствие их движение осуществляются посредством ротационных геодинамических волн. Другими словами, моментная геодинамика — есть вращение Земли вокруг своей оси плюс глобальная тектоника.

Предложенная нами концепция созвучна тектоническому вихревому подходу в работе [Мирлин, 2009], но имеет существенное отличие — содержит принципиально новый физически, геофизически и геологически обоснованный моментный (не трансляционно-глобально—тектонический! [Новая..., 1974; Мирлин, 2009]) механизм «генерации» вихревых волновых движений геосреды. Именно моментный механизм, как показывают геолого-физические данные [Вихри..., 2004; Ротационные..., 2007], позволяет в рамках задачи Дирихле—Дедекинда—Римана связать такие движения геосреды с геодинамическими аномалиями, в том числе с гравитационными аномалиями в виде волн геоида [Магницкий, 2006, с. 219–221] (моментными по природе [Викулин, 2009, с. 160–161]) и вследствие фрактальной изменчивости геосреды, возможно, — с гравитационными волнами.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Айзекс Б., Оливер Дж., Сайкс Л. Сейсмология и новая глобальная тектоника // Новая глобальная тектоника. М.: Мир, 1974. С. 133–179.

Белюсов В.В., Гзовский М.В. Тектонические условия и механизм возникновения землетрясений // Тр. Геофиз. ин-та АН СССР. 1954. № 2 (152).

Быков В.Г. Деформационные волны Земли: концепция, наблюдения и модели // Геология и геофизика. 2005. Т. 46, № 11. С. 1176–1190.

Викулин А.В. Феноменологическая волновая модель сейсмического процесса // Докл. АН СССР. 1990. Т. 310, № 4. С. 821–824.

Викулин А.В. Физика волнового сейсмического процесса // Петропавловск-Камчатский: КОМСП ГС РАН—КГПУ, 2003. 151 с.

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

Викулин А.В. Физика Земли и геодинамика: Учеб. пособие. Петропавловск-Камчатский: КамГУ, 2009. 463 с.

Викулин А.В., Викулина С.А. Афтершоки и эффект Доплера // Мат-лы ежегодной конференции, посвященной дню вулканолога. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2007. С. 300–311.

Викулин А.В., Иванчин А.Г. Ротационная модель сейсмического процесса // Тихоокеан. геология. 1998. Т. 17, № 6. С. 95–103.

Викулин А.В., Тверитинова Т.Ю. Энергия тектонического процесса и вихревые геологические структуры // Докл. РАН. 2007. Т. 413, № 3. С. 372–374.

- Викулин А.В., Тверитинова Т.Ю.* Моментная волновая природа геологической среды // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2008. № 6, С. 16–16.
- Вихри в геологических процессах / Ред. А.В. Викулин. Петропавловск-Камчатский: КГПУ. 2004. 297 с.
- Гзовский М.В.* Основы тектонофизики. М.: Наука, 1975. 536 с.
- Гольдин С.В.* Физика «живой» Земли // Проблемы геофизики XXI века. Кн. 1. М.: Наука, 2003. С. 17–36.
- Гончаров М.А., Талицкий В.Г., Фролова Н.С.* Введение в тектонофизическое Учеб. пособие. М.: КДУ, 2005. 496 с.
- Давыдов А.С.* Солитоны в квазиодномерных молекулярных структурах // Успехи физ. наук. 1982. Т. 138, вып. 4. С. 603–643.
- Дмитриевский А.Н., Володин, И.А., Шипов Г.И.* Энергоструктура Земли и геодинамика. М.: Наука, 1993. 156 с.
- Жарков В.Н.* Внутреннее строение Земли и планет. М.: Наука, 1983. 416 с.
- Зоненшайн Л.П., Савостин Л.А.* Введение в геодинамику. М.: Наука, 1979. 318 с.
- Кондратьев Б.П.* Теория потенциала и фигуры равновесия. М.; Ижевск: Ин-т компьютерных технологий, 2003. 624 с.
- Курленя М.В., Опарин В.Н.* Проблемы нелинейной геомеханики. Ч. 2 // ФТПРПИ. 2000. № 4.
- Ли Сыгуан.* Вихревые структуры Северо-Западного Китая. М.; Л.: Госгеолтехиздат, 1958. 130 с.
- Магницкий В.А.* Внутреннее строение и физика Земли / Ред. А.О. Глико. М.: Наука, 2006. 390 с.
- Маслов Л.А.* Геодинамика литосферы тихоокеанского подвижного пояса // Хабаровск; Владивосток: Дальнаука, 1996. 200 с.
- Международный геолого-геофизический атлас Тихого океана. М.; СПб.: Межправительственная океанографическая комиссия, 2003. 120 с.
- Мелекесцев И.В.* Вихревая вулканическая гипотеза и некоторые перспективы ее применения // Проблемы глубинного вулканизма. М.: Наука, 1979. С. 125–155.
- Мирлин Е.Г.* Вихревая тектоника // Докл. РАН. 2009. Т. 426, № 5. С. 649–652.
- Морган В.* Океанические поднятия, глубоководные желоба, большие разломы и блоки земной коры // Новая глобальная тектоника. М.: Мир, 1974. С. 68–93.
- Мухамедиев Ш.А., Зубович А.В., Кузиков С.И.* Выделение блоков земной коры по данным GPS-измерений // Докл. РАН. 2006. Т. 408, № 4. С. 1–4.
- Николаевский В.Н.* Математическое моделирование уединенных деформационных и сейсмических волн // Докл. РАН. 1995. Т. 341, № 3. С. 403–405.
- Николаевский В.Н.* Геомеханика и флюидодинамика. М.: Недра, 1996. 447 с.
- Новая глобальная тектоника (тектоника плит). М.: Мир, 1974. 472 с.
- Лейве А.В.* Тектоника и магматизм // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1961. № 3. С. 36–54.
- Проблемы геофизики XXI века: В 2 кн. / Ред. А.В. Николаев. М.: Наука, 2003.
- Пушаровский Ю.М.* Глобальная тектоника в перспективе // Тектоника земной коры и мантии. Тектонические закономерности размещения полезных ископаемых: Матлы XXXVIII Тектонического совещания. М.: ГЕОС, 2005. Т. 2. С. 121–123.
- Рикитакэ Т.* Геофизические и геологические данные о Японской островной дуге и ее обрамлении // Окраины континентов и островные дуги. М.: Мир, 1970. С. 216–236.
- Ротационные процессы в геологии и физике / Ред. Е.Е. Милановский. М.: КомКнига, 2007. 528 с.
- Садовский М.А.* Геофизика и физика взрыва. М.: Наука, 2004. 440 с.
- Сато Х.* Повторные геодезические съемки // Методы прогноза землетрясений. Их применение в Японии. М.: Недра, 1984. С. 108–120.
- Седов Л.И.* Механика сплошной среды. Т. 1. М.: Наука, 1973. 536 с.
- Слензак О.И.* Вихревые системы литосферы и структуры докембрия. Киев: Наукова думка, 1972. 182 с.
- Спорные аспекты тектоники плит и возможные альтернативы / Ред. В.Н. Шолпо. М.: ИФЗ РАН, 2002. 236 с.
- Сэффмэн Ф.Дж.* Динамика вихрей. М.: Научный мир, 2000. 376 с.
- Шерман С.И., Горбунова Е.А.* Волновая природа активизации разломов Центральной Азии на базе сейсмического мониторинга // Физическая мезомеханика. 2008. Т. 11, № 1. С. 115–122.
- Харленд У.Б., Кокс А.В., Ллевеллин П.Г.* и др. Шкала геологического времени. М.: Мир, 1985. 139 с.
- Хейцлер Дж., Диксон Г., Херрон Е.* и др. Морские магнитные аномалии, инверсии геомагнитного поля и движения океанического дна и континентов // Новая глобальная тектоника. М.: Мир, 1974. С. 38–57.
- Elsasser W.M.* Convection and stress propagation in the upper mantle // Applications modern physics to the Earth and planetary interiors / Ed. S.K. Runcorn. N.Y.: Wiley Interci, 1969. P. 223–246.
- Fujiwhara S., Tsujimura T., Kusamitsu S.* On the Earth-vortex, echelon faults and allied phenomena // Gerlands Beiträge zur Geophysik, zweite Supplementband. 1933. P. 303–360.
- Lee J.S.* Some Characteristic Structural Types in Eastern Asia and Their Bearing upon the Problems of Continental Movements // Geol. Mag. 1928. Vol. 66. P. 422–430.
- Takeo M.* Ground rotational motions recorded in near-source region of earthquakes // Geophys. Res. Lett. 1998. Vol. 25. P. 789–792.