



NEW TYPE OF ELASTIC ROTATIONAL WAVES IN GEO-MEDIUM AND VORTEX GEODYNAMICS

A. V. Vikulin

*Institute of Volcanology and Seismology, Far East Branch of RAS,
683006, Petropavlovsk-Kamchatsky, Piip blvd, 9, Russia*

Abstract: Natural-science concepts of rotational movements and the 'lumpy' structure of medium are reviewed with a focus on key aspects. Through using torsional traps for hunting and «implementing» mechanical torque for ignition, Homo sapiens developed to man. Vortex movements «impregnated» in spiral structures of shells and torsional movements of toothy whales and fish were intuitively perceived by man as major stable movements of the environment. Based on the above, the ancient philosophy established the concept of *the uniform world* represented by atomic («non-cuttable») structure of medium and vortex movements of ether. Based on conclusive arguments stated by R. Dekart, H. Helmgolz, Lord Kelvin and others within the framework of classical physics and in the first half of the 20th century by scientists in quantum physics and cosmogony, both «quantum structure» («lumpiness») and rotation («vorticity») are integral features of matter – space – time throughout the whole range from elementary particles to galaxies and galactic clusters.

Nowadays researchers in natural sciences, particularly in the Earth sciences, call attention again to the problem of structure of matter and its movements. In the 1920s, Chinese geologist Li Siguang established fundamentals of vortex geodynamics. In the second half of the 20th century, Li Siguang's concepts were developed by geologists O.I. Slenzak and I.V. Melekestsev. Geologist A.V. Peive, mechanic L.I. Sedov and physicist M.A. Sadovsky put forward a concept of block structure of the geo-medium (geological and geophysical medium) and proposed a justified assumption that such blocks can move by own torque. This method of movement is confirmed by results of geological and tectonophysical studies, as well as instrumental geophysical measurements obtained from a variety of stations and focal zones of strong earthquakes. Many researchers, including W. Elsasser and V.N. Nikolaevsky, develop fundamentals of nonlinear wave mechanics of the geo-medium, admitting rotational movements of blocks. According to M.V. Stovas, V.E. Khain and other researchers, rotation of the planet around its axis is of critical importance for understating the origin of geodynamic movements.

Based on the review of results from the previous comprehensive geological and geophysical studies, a conclusion is made on the torque origin of rotating block geo-medium which is termed as Peive–Sedov–Sadovsky medium. Analyses of migration of earthquake foci and volcanic eruptions and movements of edges of tectonic plates provided grounds to design a principally new model, and this rotational model is described in the present publication. Blocks and plates interacting with each other in the model are interrelated by long-range elastic fields which comprise a uniform planetary geodynamic medium, i.e. 'self-consistent' state of the geo-medium. Briefly reviewed are data about vortex geological structures and rotary motions of blocks and plates; such data have been detected and recorded in abundance in a variety of geophysical fields. It is stressed that similar, in principle, vortex movements / flows are solutions of the well known Dirichlet–Dedekind–Riemann problem of rotating and gravitating liquid drop that is the problem of the Earth's equilibrium shape. According to the proposed rotational model, geodynamic solutions of the rotational model combine geodynamic flows in the solution of the problem of the Earth's equilibrium shape and geologic-geophysical vortex structures and movements on the Earth's surface in one and the same class of phenomena. It is proposed to apply such solutions for establishing a new geological paradigm – new torque (and/or wave / vortex) geodynamics.

Keywords: geodynamics, rotational movements, geo-medium.

Recommended by S.I. Sherman 3 March 2010

Vikulin A.V. New type of elastic rotational waves in geo-medium and vortex geodynamics // Geodynamics & Tectonophysics. 2010. V. 1. № 2. P. 119–141.

НОВЫЙ ТИП УПРУГИХ РОТАЦИОННЫХ ВОЛН В ГЕОСРЕДЕ И ВИХРЕВАЯ ГЕОДИНАМИКА

А. В. Викулин

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, 683006, Петропавловск-Камчатский, бульвар Пийпа, 9, Россия

Аннотация: В работе представлен обзор естественно-научных представлений о вращательном движении материи и ее «кусковатом» строении. Обращается внимание на следующие узловые моменты. Вихревые движения, «защитые» в спиральных структурах раковин и в крутильных движениях тел зубатых китов и рыб, интуитивно воспринимались человеком как основные устойчивые движения окружающего его мира, что позволило античным мыслителям сформулировать очевидную для них концепцию *единого мира* в виде атомарного («неразрезаемого») строения материи и вихревых движений эфира. Р. Декартом, Г.Ф. Гельмгольцем, лордом Кельвиным и другими в рамках классической физики, а затем исследователями первой половины XX в. в рамках квантовой физики и космогонии было убедительно показано, что и «квантованность» («кусковатость»), и вращение («завихренность») являются неотъемлемыми свойствами материи–пространства–времени во всем масштабе – от элементарных частиц до галактик и их скоплений.

В настоящее время наблюдается очередное в истории естествознания повышение интереса к проблеме строения материи и ее движения, и это происходит именно в науках о Земле. В 1920-х гг. китайским геологом Ли Сыгуаном закладываются основы вихревой геодинамики. Во второй половине XX в. представления Ли Сыгуана развиваются геологами О.И. Слензаком и И.В. Мелекесцевым. Геологом А.В. Пейве, механиком Л.И. Седовым и физиком М.А. Садовским предлагается концепция блокового строения геосреды, геологической и геофизической, и обосновывается возможность движения слагающих ее блоков под действием собственных моментов. Такой механизм движения подтверждается геологическими и тектонофизическими исследованиями, инструментальными геофизическими измерениями, выполненными на разных базах и в эпицентральных зонах сильных землетрясений. В. Эльзассером, В.Н. Николаевским и многими другими исследователями разрабатываются основы нелинейной волновой механики геосреды, допускающей вращательные движения блоков. М.В. Стова-сом, В.Е. Хаиным и другими обращалось внимание на исключительную важность вращения планеты вокруг собственной оси для понимания природы геодинамических движений.

Обобщением результатов предыдущих комплексных геолого-геофизических исследований является сформулированный в работе вывод о моментной природе вращающейся блоковой геосреды – среды Пейве–Седова–Садовского. Анализ миграции очагов землетрясений и вулканических извержений 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 взаимодействующие между собой блоки и плиты в рамках ротационной модели взаимосвязаны упругими дальнедействующими полями, формирующими единое планетарное геодинамическое поле – «самосогласованное» состояние геосреды. Проводится краткий обзор большого объема накопленных данных о вихревых геологических структурах и поворотных движениях блоков и плит, выделяемых и регистрируемых в различных геофизических полях. Обращается внимание на то, что такие же, по сути, вихревые движения – течения – являются решениями известной задачи Дирихле–Дедекинда–Римана о вращающейся гравитирующей капле жидкости – задаче о равновесной форме Земли.

Предлагается объединить в один класс явлений гидродинамические процессы, уравнивающие форму Земли при вращении, с тектоническими движениями, вызывающими формирование геолого-геофизических вихревых структур, для построения новой геологической парадигмы – моментной (и/или волновой, и/или вихревой) геодинамики.

Ключевые слова: геодинамика, вращательные движения, геосреда.

ВВЕДЕНИЕ

Цикличность происходящих на Земле глобальных процессов с характерными периодами 10^7 – 10^9 лет – важнейшее научное положение современной геологии. Впервые идея повторяемости глобальных циклов развития Земли была высказана Д. Геттоном в конце XVIII столетия. В XIX веке и начале XX века ее активно пропагандировали Э. Ог, М. Бертран, Э. Зюсс и Г. Штиле; позднее учение о циклах получило развитие в работах и многих других геологов. Благодаря их исследованиям, сам факт существования таких циклов сегодня уже не является предметом споров специалистов, и основной акцент в проблеме сместился от их выявления и доказательства к вопросам о природе самой цикличности и причинах, ее вызывающих [Милановский, Вику-

лин, 2007].

Изучение влияния ротации Земли на процессы, связанные с развитием ее внутренней, или, как говорят геологи, глубинной структуры, имеет многовековую историю. Еще основатели европейской геологии Дж. Геттон, Дж. Плейфер, Ч. Лайель и астроном У. Гершель с вращением Земли связывали дифференциацию ее ядра и коры. Русский естествоиспытатель Е. Быханов в работах 1877 и 1894 гг. связывал горообразование с замедлением вращения нашей планеты. Существование возможной связи между деформацией земной коры и ротационными силами планеты отмечали А.П. Карпинский, Д.И. Мушкетов, Н.С. Шатский, Б.Л. Личков, А.Л. Яншин, В.Е. Хаин и другие отечественные, а также зарубежные ученые.

Согласно данным геологии и в целом наук о Зем-

Земле, в настоящее время не вызывает сомнений как существование эффектов пульсаций [Милановский, 1995] и тектонических перестроек [Тверитинов, Тверитинова, 2006] планеты, «генерирующих» зоны сжатия, растяжения и сдвига, так и их взаимосвязь с вращением Земли [Хаин, Ломизе, 2005].

В последнее десятилетие на фоне дискуссии о новой глобальной тектонике [Спорные аспекты..., 2002; Пущаровский, 2005] резко усилился интерес к вихревым геологическим структурам [Вихри..., 2004; Ротационные процессы..., 2007].

1. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ (ОБЗОР ПРЕДСТАВЛЕНИЙ)

По современным данным, геологическая и геофизическая среда является блоковой и вращающейся. Определенный интерес вызывают «генезис» и становление важных для геологии и геофизики обозначенных во введении концепций и представлений. Согласно данным работ [Викулин, 2008б; 2009], их развитие происходило в следующей последовательности.

1.1. Период практического изучения вращательного движения

20 тыс. лет до н.э. Эпоха неолита. Для поимки зверей человеком изобретены первые механические приспособления – крутильные ловушки, использующие потенциальную энергию скрученных сухожилий животных, лиан, лыка и др.

8–6 тыс. лет до н.э. Ранний неолит. Появился колесорот, с помощью которого человек научился делать отверстия в камне.

3.5 тыс. лет до н.э. Изобретение гончарного круга, что фактически означало практическое овладение свойством трения качения.

470–370 гг. до н.э. Демокрит из Абдери вводит представления о вихревых атомах и окружающей их пустоте.

1.2. Теоретическое изучение вращательного и вихревого движений

1644 г. Выход в свет книги Р. Декарта «Начала философии», где автор предложил первую модель образования Солнечной системы, в которой, в соответствии с представлениями античных мыслителей, причиной возникновения системы стали вихревые «зародышевые» движения – единственно устойчивые формы движения.

1755, 1796 гг. Выход в свет вихревых моделей образования Солнечной системы сначала И. Канта, а затем П. Лапласа.

Середина XIX в. Задача прогноза погоды и, как следствие, проблема построения теории атмосферных циклонов привели к возрождению интереса к вихревой динамике: труды Г.Ф. Гельмгольца, В. Томсона (лорда Кельвина), Г.Р. Кирхгофа и др.

1860 г. Выход в свет фундаментальной работы П. Дирихле [Кондратьев, 2003]. Математик П. Ди-

рихле внес настолько революционный вклад в основы теории фигур равновесия, что раздвинул сами границы этой дисциплины. Поставленная П. Дирихле проблема такова. Дана однородная несжимаемая масса гравитирующей жидкости. Допускают ли законы гидродинамики такое движение этой массы, чтобы ее форма в любой момент оставалась эллипсоидальной, а поле скоростей жидкости – линейным по координатам? П. Дирихле поставил задачу и получил уравнения движения такого эллипсоида.

Если до П. Дирихле говорили исключительно о фигурах равновесия, то теперь вопрос поставлен значительно шире: существуют ли однородные эллипсоиды с внутренними течениями? Фигуры же относительного равновесия – всего лишь частный случай стационарных фигур в проблеме П. Дирихле. Ключевым в этой проблеме является условие линейности внутреннего поля скоростей в эллипсоидах – только оно делает решаемой трудную динамическую задачу учета сил Кориолиса. В итоге поля сил гравитации, Кориолиса и центробежной силы в эллипсоиде оказываются линейными. Суперпозиция этих силовых полей, без которой проблема Дирихле вообще не имела бы смысла, и порождает обширное семейство возможных конфигураций движений.

Ю. Дедекенд отметил особую, присущую уравнениям движения эллипсоида Дирихле симметрию, которая указывает на возможность существования во вращающихся средах вихревых течений [Кондратьев, 2003].

Самый значительный вклад в разработку идеи П. Дирихле внес великий математик Б. Риман. Он впервые рассмотрел стационарные фигуры равновесия и открыл класс двухпараметрических равновесных эллипсоидов, у которых вектор угловой скорости и вектор вихря внутренних течений совпадают с одной из главных осей симметрии фигуры, – S-эллипсоиды Римана. Еще более удивительными являются эллипсоиды Римана с наклонным вращением. У таких фигур (например, Земли) оси вращения и вихря не совпадают с главными осями эллипсоида, что значительно увеличивает число возможных решений и возможности их применения к задачам геодинамики: ось вращения Земли и магнитная ось не совпадают. Подробно этот аспект проблемы отражен в работе [Викулин, 2005].

1925 г. Американские ученые Дж. Уленбек и С. Гаудсмит с целью теоретического объяснения экспериментальных данных предложили рассматривать электрон как «вращающийся волчок» с собственным механическим и магнитным моментами. Таким гипотетическим способом в физику и был введен спин.

Во-первых, спин является одним из специфических понятий квантовой механики, отражающих саму ее суть [Ландау, Лифшиц, 1974], и в то же время спин является таким же «первым» свойством частицы, как и ее «вполне классические» параметры (масса, заряд) [Ферми, 1968]. Во-вторых, при таком определении спина становится несущественным вопрос о его происхождении, поэтому собственный

момент может быть приписан частице вне зависимости от того, является ли она «элементарной» или «сложной» [Ландау, Лифшиц, 1974]. В-третьих, большое количество экспериментального материала показывает, что спиновые свойства элементарных частиц играют огромную роль как в области микропроявлений, так и в поведении макроскопических тел, поскольку спин непосредственно определяет статистические свойства систем [Левич и др., 1971].

Такие свойства спина, с одной стороны, вывели проблему его природы за рамки физики, с другой – позволили ввести формализм в применения понятия квазичастиц (слабых возбуждений всего тела – «почти» элементарных частиц) [Лифшиц, 1949], что впоследствии послужило теоретической предпосылкой концепции *собственного макроскопического момента* сначала в геологических структурах [Пейве, 1961], а затем и в механических [Седов, 1973].

1.3. Начало «вихревой» геодинамики

1928 г. Начало «вихревого» этапа в геологии и тектонике: 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.

1933 г. В результате проведения повторных геодезических работ японскими исследователями [Fujiwara et al., 1933] впервые формулируется вывод о *вращательном движении блока земной коры*, в котором располагался очаг землетрясения Канто 1.09.1923, $M = 8.2$. Величина горизонтальных перемещений при таком движении составляла 2 м и более.

Начало 1950-х гг. Теоретические физические исследования трещины Гриффитса и моделирование тектонических разломов в лабораторных условиях приводят к выводу о *вращении* образующихся в материале трещин [Магницкий, 1965; Yoffe, 1951].

1954 г. Экспериментальное изучение механизма образования тектонических разломов и нарушений геофизической среды при землетрясениях показало, что образующиеся в материале трещины при определенных условиях его нагружения испытывают вращение [Белоусов, Гзовский, 1954; Гзовский, 1975].

1959 г. М.В. Стовас [1975] обратил внимание на очевидный факт, согласно которому изменение угловой скорости вращения Земли обуславливает изменение полярного сжатия Земли и приводит к сопряженной деформации всех ее основных параметров. По-видимому, М.В. Стовас первый дал количественное объяснение этому факту. Он показал, что при изменении ротационного режима вращения Земли возникают широтные, меридиональные и радиальные напряжения в ее коровом слое, которые и являются причиной особого напряженного состояния в широтных зонах между 30 и 40° в обоих полушариях – зонах перемены знака главных напряжений.

В последующем о важности ротационных движений писали П.С. Воронов, В.Г. Бондарчук, О.И. Слензак, Б.Л. Личков, К.Ф. Тяпкин, В.Е. Хаин и многие другие. В настоящее время можно считать общепринятой важность ротационного фактора.

1.4. «Блоковая» тектоника

1961 г. Выход в свет фундаментальной работы А.В. Пейве [1961]. В контексте авторского рассмотрения выделим три аспекта этой работы (курсив – А.В.).

Во-первых, автор обосновывает *блоковое строение земной коры*.

Во-вторых, анализируя ее структуру и движение, приходит к новому, фантастическому по тем (да и по нынешним, пока, тоже) временам выводу о механизме движения коры – *собственному источнику движения блока*. Принимая внешний по отношению к Земле динамический фактор скачкообразного изменения ее угловой скорости вращения, вызывающий к жизни геологические явления, автор приходит к выводу, что в результате «кора будет стремиться к новому механическому равновесию. При этом каждый структурно обособленный, более или менее цельный однородный блок, естественно, будет иметь свой собственный «потенциал перемещения», в чем и *заключается главная особенность тектонических движений*». Все тектонические теории до сих пор не знали такого механизма движения земной коры, т. е. не считались с тем, что *«каждый блок обладает как бы самостоятельной движущей силой, заключенной в нем самом»*.

В-третьих, *«тектонические силы и вектор необратимых тектонических движений являются «врожденными» извечными свойствами нашей и, вероятно, других планет и связаны не с процессами развития вещества внутри каждой планеты, а с более общими законами движений космических тел*. А наиболее яркие «эндогенные» процессы – магматизм и тепловой поток Земли – в конечном счете, в основном порождаются гигантской, внешней по отношению к Земле механической энергией, т. е. являются вторичными. Мы ставим, таким образом, вопрос о пересмотре распространенных среди геологов представлений о связях или структуре геологических явлений. Геологи вместе с тем *должны поставить вопрос перед астрономами и астрофизиками* о том, что даже за относительно короткий период неогейского мегахрона продолжительностью *около 1 млрд лет*, вероятно, происходит заметное поступательное развитие, *эволюция гравитационного поля Солнечной системы*, так как порождаемые этими изменениями геологические процессы, несомненно, эволюционируют».

Следует отметить, что и сейчас, с позиции начала XXI в. [Вихри..., 2004; Ротационные процессы..., 2007], мы только-только начинаем подходить к пониманию всей важности с точки зрения геологии *взаимосвязи* затронутых А.В. Пейве около полувека тому назад вопросов: *блоковая среда ↔ «собственная» движущая сила блока ↔ эволюция Солнечной системы ↔ гравитация*.

1960–1970 гг. Тектонофизические исследования устанавливают пространственную волнистость крупных тектонических разрывов и формулируют вывод о том, что представления об их прямолинейности часто не соответствуют наблюдаемым фактам [Гзовский, 1975].

1963–1965 гг. Объединение теоретических и экспериментальных условий образования трещин привело к выводу о том, что при скорости развития трещины больше $0.6 V_S$ (V_S – скорость поперечных упругих волн) происходит ее закручивание и при $0.9 V_S$ направление практически совпадает с направлением максимального скалывающего напряжения [Белоусов, Гзовский, 1954; Магницкий, 1965; Brace, Bombolakis, 1963; Yoffe, 1951].

Выход в свет в СССР и в Германии ряда работ, авторы которых независимо друг от друга подтвердили влияние вращательной динамики Земли на формирование сетки ее планетарных разломов [Хаин, Полетаев, 2007].

1.5. Волновая «моментная» тектоника

1969 г. Выходит в свет работа В. Эльзассера [Elsasser, 1969], в которой построена первая механическая модель, допускающая решение в виде медленных тектонических волн.

Конец 1960-х – начало 1970-х гг. Л.И. Седовым [1973] обращается внимание на важность механических задач с собственным моментом количества движения макроскопических по размерам объемов вещества.

1970 г. Выход в свет работы С. Ломниц [Lomnitz, 1970], в которой было показано, что видимые «горбы», движущиеся из очага Чилийского землетрясения 21.05.1960, $M_w=9.5$, вдоль поверхности Земли, можно отождествить с гравитационными упругими волнами, распространяющимися в земной коре. Аналогичные «горбы» из очагов землетрясений ранее наблюдались в Японии (Канто, 1923, $M=8.2$) и на Камчатке (1959, $M=7.6$). Данные по наблюдению за движениями грунта при катастрофическом землетрясении в Мексике в 1985 г. подтвердили вывод о «гравитационной» природе движущихся из очага видимых «горбов» земной поверхности [Lomnitz, 1990].

Аналогом таких движений в «обычной» среде являются гравитационные волны, возникающие после сильных землетрясений и распространяющиеся вдоль поверхности воды, – цунами. Траекториями движений частиц среды при распространении таких волн в воде (и в любой другой жидкости) являются эллипсы. Направление движения частицы среды на поверхности Земли вдоль эллиптической траектории – против направления распространения волны. Такое направление движения частиц отличает гравитационные волны от поверхностных волн Релея, в которых частицы среды на поверхности движутся в направлении распространения волны. Поэтому распространение волновых гравитационных движений возможно только в такой твердой среде, которая состоит из блоков, способных при определенных условиях «свободно» поворачиваться (прово-



Рис. 1. Векторное изображение смещений триангуляционных пунктов I класса за период приблизительно 60 лет [Рикитакэ, 1970].

Fig. 1. Scheme of displacement vectors of triangulation stations (class I) for almost 60 years of observations [Rikitake, 1970].

рачиваться). Именно такое вращательное движение блоков и может обеспечить достаточно малое значение скорости передачи упругой энергии (по сравнению с «обычным» звуком – сейсмической волной) в твердом теле с помощью механизма гравитационных волн.

Отметим, что в классической теории упругости твердое (невязкое) тело по своим упругим свойствам подразумевается однородным и «непрерывным». В таком теле гравитационные волны вследствие молекулярных по своей сути сил сцепления между его достаточно малыми по размеру частицами распространяться не могут.

1970, 1984 гг. Выход в свет работ японских исследователей – сначала Т. Рикитакэ [1970], а затем Х. Сато [1984], в которых приведены данные повторных (с интервалом в полвека) геодезических измерений I класса, выполненных в 300 пунктах, расположенных в пределах всего о. Хонсю (рис. 1). Результирующее, между двумя эпохами измерений, движение, представленное 300 векторами, оказалось изображенным в виде нескольких закручивающихся (вихревых) структур, одна из которых является отражением движений, имевших место в очаге землетрясения Канто в 1923 г. [Fujiwhara et al., 1933] и после него.

1972 г. Выход в свет работы О.И. Слензака [1972], развивающей на новом качественном уровне представления Ли Сыгуана [Ли Сыгуан, 1958; Lee, 1928] о вихревых структурах на поверхности твер-

дой Земли. В результате проведенных О.И. Слензаком в 1950–1970 гг. исследований было доказано существование крупных, превышающих 1000 км в диаметре, вихревых структур, сделан вывод о «самостоятельности крупной вихревой системы как типа тектонической структуры литосферы, который не может быть создан внешними источниками движения в виде дрейфующих материков или смещений по планетарным разломам». При этом породы, слагающие вихревые структуры, формировались «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». Отмечено, что «перекрытие вихревых систем» приводит к «образованию систем меньшего размера, соединяя в новые вихри отрезки больших дуг крупных систем», что «иерархическая соподчиненность тектонических структур связывает в неразрывную цепь ... самостоятельные тектонические формы и геологические тела складчатых областей и их обрамления». Другими словами, системы вихревых структур, как показано автором, связаны в единую иерархическую тектоническую планетарную структуру.

Монография О.И. Слензака [1972] никак не повлияла на отношение научной общественности к проблеме вихревых структур в геологии – они по-прежнему для ученых – геологов и геофизиков – просто не существовали.

1975 г. Устанавливается пространственная волнистость крупных разрывов. Делается вывод о том, что «представление о прямолинейности крупных разрывов, содержащееся во многих учебниках по структурной геологии, часто не соответствует описанным фактам. Вероятно, нужно говорить об общем, среднем направлении простирания каждого разрыва, отклонения от которого будут наблюдаться повсеместно» [Гзовский, 1975].

1.6. Блочные модели геофизической среды

1979 г. М.А. Садовским [1979] устанавливается «кусковатый» (блоковый) характер геофизической среды.

И.В. Мелекесцевым [1979] предлагается вихревая вулканическая гипотеза и рассматриваются некоторые ее следствия. В частности, анализ протяженностей линий трещинных извержений в верхнем плейстоцене и в послеледниковую эпоху приводит автора к выводу о вращении Исландии по часовой стрелке со скоростью $5 \cdot 10^{-4}$ град/год.

Эти данные подтверждаются наблюдениями, приведенными в Международном геолого-геофизическом атласе Тихого океана [2003], в котором на основании многолетних детальных инструментальных исследований различных геофизических полей показывается, что расположенные в юго-западной части Тихого океана плиты Пасха и Хуан-Фернандос (их размеры в поперечнике составляют 300–400 км) вращаются. Плита Пасха примерно за 5 млн лет своего существования повернулась почти на 90° , что позволяет такое вращение плит со скоростью

$\approx 10^{-5}$ град/год считать непрерывным (в геологическом смысле). При этом изолинии всех геофизических полей, отражающих поворотное движение этих плит (рис. 2), представлены спиральными линиями.

1983 г. Получение С. Чандрасекхаром Нобелевской премии за цикл работ, посвященных динамике звезд и выполненных в рамках обозначенной выше проблемы П. Дирихле. Например, выяснилось, что 11-летняя цикличность солнечной активности является, по сути, отражением структуры вихревых течений нашего светила [Тимашев, 2003].

В соответствии с полученными в 1960–1990-е гг. данными о большой амплитуде движения центра масс Солнца, которая в два раза превышает его диаметр, стало ясно, что цикличность солнечной активности обусловлена не внутренней динамикой Солнца. Солнечная активность, а следовательно, и большая часть земных явлений, включая социум [Леви и др., 2003], определяется сложной моментной динамикой всей Солнечной системы, в первую очередь моментной динамикой Юпитера, период обращения которого вокруг Солнца составляет около 11 лет. Отметим, что Юпитеру «принадлежит» большая часть момента количества движения (и орбитального – 61 %, и собственного – 63 %) всей Солнечной системы [Викунин, 2009; Тимашев, 2003].

1983–1985 гг. Выход в свет работ М.А. Садовского и других исследователей, посвященных геофизической среде [Садовский, 1984, 1985; Садовский и др., 1983], в которых предложена модель сейсмического процесса в рамках геомеханического подхода [Садовский и др., 1983]. Модель строится на основании установленного авторами с сотрудниками иерархического свойства горных пород, которое наблюдается в пределах 12–14-го порядков по величине размеров. Более подробно все эти вопросы изложены в монографиях [Садовский и др., 1987; Садовский, Писаренко, 1991]. В них «геомеханический» аспект проблемы представлен авторами, по сути, как «сейсмический режим» по Ю.В. Ризниченко [1985] и/или как «структура пространственного поля сейсмичности» [Садовский, Писаренко, 1991]. Динамические же аспекты механики горных пород в работах М.А. Садовского с соавторами не рассматривались.

Идея блокового строения геофизической среды при построении моделей сейсмического процесса использовалась и ранее [Лукьянов, 1999; Пейве, 1961]. Обзор моделей «в духе Садовского», без обращения к концепции блоковой среды А.В. Пейве [Лукьянов, 1999; Пейве, 1961], приведен в работе [Любушин, 1987]. Отличительной особенностью таких моделей, по мнению автора [Любушин, 1987], является их иерархичность и сильная нелинейность дифференциальных уравнений, с помощью которых должен описываться сейсмический процесс. Однако составление такого «динамического» уравнения в рамках модели иерархической среды М.А. Садовского, на наш взгляд, вряд ли осуществимо вследствие невозможности (принципиального характера) определения в ее рамках взаимодействия между очагами землетрясений и тектоническими структу-

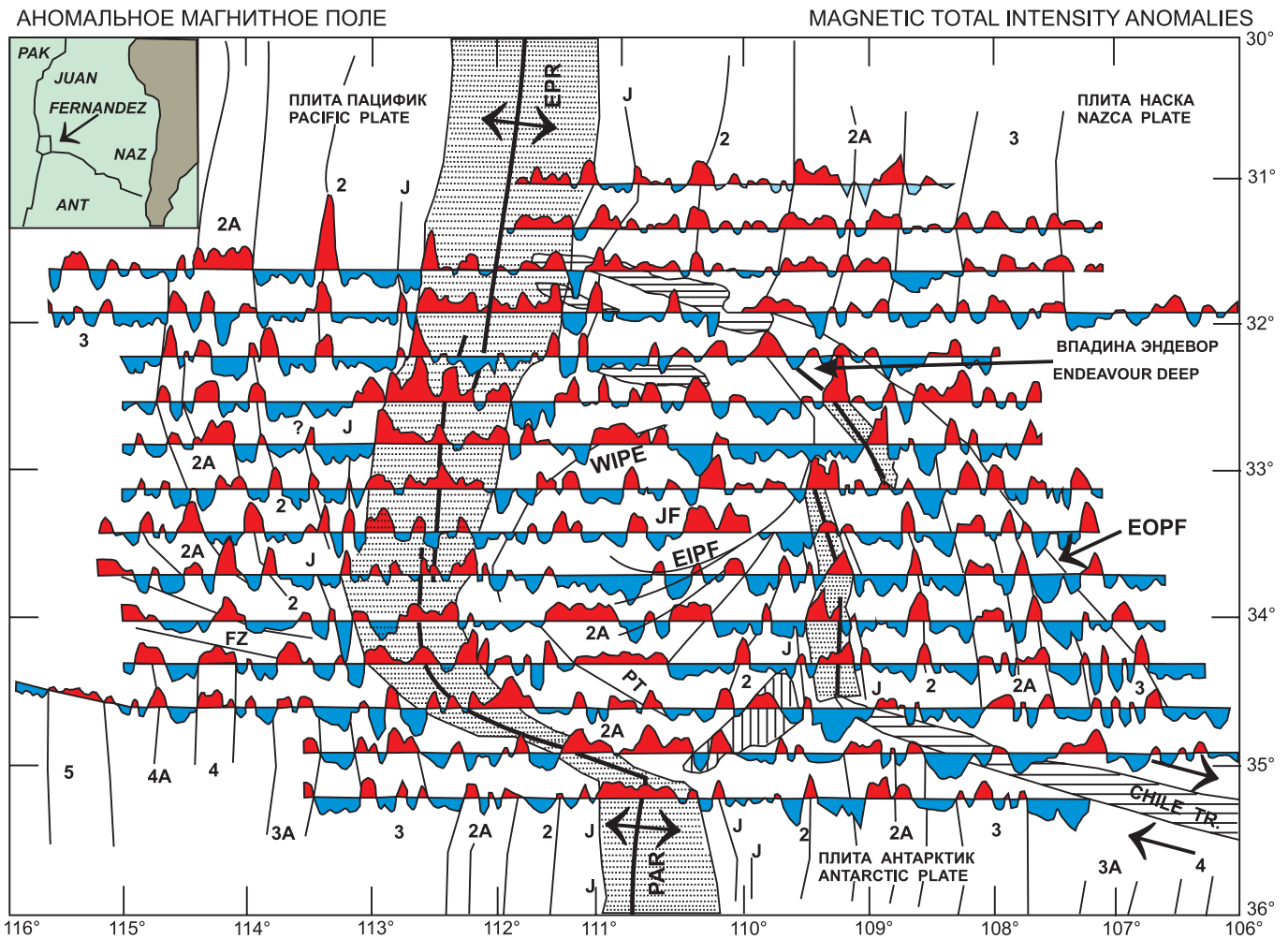


Рис. 2. Тектонические границы (жирные линии) и магнитные изохроны – корреляция магнитных аномалий (тонкие линии) по данным [Международный геолого-геофизический атлас..., 2003].

Fig. 2. Tectonic margins (solid lines) and magnet isochrones – correlation of magnetic anomalies (thin lines) as given in [International Geological and Geophysical Atlas..., 2003].

рами.

Видимо, сам М.А. Садовский это чувствовал и понимал. В воспоминаниях Ю.Н. Авсюка [2004] отмечается, что М.А. Садовский активно интересовался вопросами, связанными с «тектонической силой» и ее возможным физическим эквивалентом, связанным с ротационным режимом вращения Земли.

Так или иначе, но выход иерархической модели геофизической среды М.А. Садовского на геодинамические процессы, в том числе на явления, связанные с распространением тектонических волн, представляется проблематичным.

1986 г. Выход в свет монографии Л.А. Маслова [1986], в которой на основании данных о палеонапряжениях и угловых осцилляциях вектора скорости Тихоокеанской плиты показывается, в частности, что в течение последних 30 млн лет тектоническое поле напряжений Тихоокеанского пояса неоднократно (пять раз) перестраивалось. В результате повороты Тихоокеанской плиты вокруг горячей «га-

вайской» точки в разные стороны составляли до 10° , что соответствует амплитуде колебаний границы плиты, равной пяти сотням километров. Выполненный Л.А. Масловым анализ движущих механизмов геодинамики показал, что обоснование таких колебательных движений Тихоокеанской плиты, происходящих на вращающейся Земле, в рамках непрерывных («обычных», не блоковых) моделей, в принципе, невозможно.

1986–2009 гг. Вывод о вращательном движении блоков земной коры, в том числе являвшихся очагами сильнейших землетрясений Алеутских островов, Колумбии, Эквадора и других регионов планеты, подтверждается многочисленными геофизическими и геологическими по содержанию работами ряда исследователей [Геологическая история..., 1989; Daly, 1989; Geist et al., 1988; Hashimoto, Tada, 1988; Nur et al., 1986].

Анализ всех известных данных, приведенных выше и в работах [Вихри..., 2004; Зоненшайн, Савостин, 1979; Ротационные процессы..., 2007],

позволяет сделать вывод [Викулин, 2009], что отмеченные углы, на которые отдельно взятые блоки и плиты повернулись в течение последних миллионов лет, лежат в пределах $0 \leq \gamma \leq 90^\circ$ при угловых скоростях их поворота

$$\frac{d\beta}{dt} \approx 10^{-(6\pm 1)} \text{ град/год.} \quad (1)$$

1988 г. Разрушительное землетрясение с очагом вблизи г. Спитак (Армения). Многочисленные свидетельства *крутильных* колебаний поверхности грунта при землетрясении отчетливо проявились в массовых поворотах архитектурных памятников и надгробных камней, характерных разрушениях торцевых и центральных частей зданий и сооружений [Аносов и др., 2004; Землетрясения: уроки..., 1989]. Такие же поворотные движения наблюдались при землетрясениях в других местах планеты [Езупов, 2000; Жунусов и др., 1980; Клячко, 1999; Huang, 2001]. Многочисленные доказательства присутствия в сильных движениях грунта интенсивной вращательной компоненты приведены в работе С.А. Халчанского [1998].

1.7. Волновые ротационно-вихревые модели нелинейных геосред

1993 г. Выход в свет работы А.Н. Дмитриевского с соавторами [1993], уже название которой «Энергоструктура Земли и геодинамика» говорит о принципиально новом подходе к физике Земли и геодинике. В качестве основы такого подхода авторы предлагают ввести понятие «системное движение материи», базирующееся на новой теории вакуума и поля инерции. В рамках таких представлений авторы показывают, что характерные движения геологической и геофизической сред в полях инерции приводят к *различным типам вихревых и винтовых структур*. Анализируемая монография является, по-видимому, первой работой, в которой «вихревые» представления Левкиппа – Демокрита – Декарта – Лапласа распространяются на геодинамику. Именно такой подход позволяет наполнить новым физическим содержанием блоковые концепции геологической и геофизической среды, разработанные школами А.В. Пейве [Лукьянов, 1999] и А.М. Садовского [Михаил Александрович Садовский, 2004; Садовский, 1984, 1986, 2004; Садовский и др., 1983, 1987, 1991], и связать их воедино с концепцией Л.И. Седова [1973] о макроскопическом моменте – по сути, макроскопическом спине.

1995 г. Экспериментальное обнаружение признаков существования уединенных деформационных волн в геофизических полях послужило В.Н. Николаевскому [1995, 1996] основой для построения математической волновой модели поворотных движений блоков горной породы. Исследование такого рода поворотных (крутильных) волн имеет *принципиальное значение* как для выявления механизма миграции землетрясений и предвестников землетрясений в земной коре [Быков, 2005], так и для построения моделей сейсмического процесса,

использующих представления об уединенных волнах тектонического типа [Быков, 2005; Викулин, 2003].

Н. Сигачева (МГУ) с соавторами показали: «спиралевидно-скручивающее движение» может рассматриваться как «механизм самоорганизации геологического пространства» [Хаин, Полетаев, 2007].

1999 г. Начало инструментальной «вихревой» сейсмологии: впервые в мировой практике приборы *зарегистрировали* крутильные колебания грунта в ближней зоне очага землетрясения Chi-Chi, Тайвань, $M_w=7.6$ [Huang, 2001; Takeo, 1998].

Таким образом, можно считать, что экспериментальные данные о регистрации крутильных колебаний при землетрясении совместно с теоретическими представлениями С. Ломниц [Lomnitz, 1970, 1990; Lomnitz, Cactanos, 2006] и модельными в рамках ротационной волновой механики построениями в работах [Викулин, 2003; Викулин, Иванчин, 1997, 1998; Vikulin, 2006] рассеяли сомнения Н.В. Шебалина [2003] относительно эффектов «земляных волн (горбов)» и поворотов памятников, обелисков, минаретов и, тем самым, открыли новую страницу в теории «неклассической» упругости блоковых геофизических нелинейных сред.

2000–2005 гг. Выход в свет обобщающих работ В.Г. Быкова [2000, 2005]. В первой работе [Быков, 2000] представлены основные сведения о параметрах и источниках нелинейности горных пород и рассмотрены нелинейные волновые процессы на разных структурных уровнях геологических объектов. Показано, что большинство обсуждаемых математических моделей распространения нелинейных волн в геофизической среде сводится к нелинейным эволюционным уравнениям типа уравнений Бусинеска, Бюргерса, Кортевега-де-Фриза и особенно часто – *sin-Гордона*, решениями которых являются уединенные волны. Во второй работе [Быков, 2005] проведен обзор и анализ выполненных в течение последних десятилетий волновых тектонических исследований. В частности, отмечено, что существование волн миграции землетрясений и тектонических волн не вызывает сомнений, неясной остается пока природа этих волн.

1.8. Начало нового этапа вихревой геодинамики

2003 г. Начало нового этапа в развитии вихревой геодинамики. 23 марта в Институте вулканической геологии и геохимии ДВО РАН (г. Петропавловск-Камчатский) состоялся первый тематический научный семинар «Вихри в геологических процессах». По результатам семинара в 2004 г. вышел в свет одноименный сборник научных работ под редакцией А.В. Викулина [Вихри..., 2004].

Выход в свет заключительного «нелинейного» сборника под общей редакцией А.В. Николаева [Проблемы..., 2003]. Во всех семи сборниках (1977–2003 г.) на большом экспериментальном и теоретическом материале показано, что геофизическая среда в контексте нашего обзора является сильно нелинейной, самоорганизованной и даже «живой».

Выход в свет монографии А.В. Викулина [2003], в которой для блоковой вращающейся геофизической среды была построена теория волнового сейсмического процесса и показана его определяющая роль в генерации колебаний Чандлера. В рамках модели для вращающейся планеты удалось совместить представления о блоковой геофизической среде с циркулярной (крутильной) поляризацией тектонических волн, ответственных за взаимодействие блоков. Показано, что такие ротационные волны являются, по сути, новым типом упругих волн, ответственных за взаимодействие блоков и плит во вращающейся среде [Викулин, 2008а].

2007 г. Московским государственным университетом им. М.В. Ломоносова совместно с Институтом вулканологии и сейсмологии ДВО РАН выпущен второй «вихревой» тематический сборник «Ротационные процессы в геологии и физике» под редакцией академика Е.Е. Милановского. В этом сборнике вихревые движения рассмотрены широко: анализировалась их роль в процессах, протекающих в микромире, Вселенной, галактиках, планетах Солнечной системы, а также в геофизике, геологии, включая зарождение жизни и развитие социума. В частности, предложено использовать вихревые геодинамические движения и их особенности в качестве основы новой (в дополнение к глобальной тектонике плит) парадигмы геологии [Викулин и др., 2007; Викулин, Тверитинова, 2007, 2008].

Выход в свет монографии [Ферронский С.В., Ферронский В.И., 2007], в которой разработана новая теория движения нашей планеты на основах динамического равновесия. Полагается, что Земля «является самогравитирующим шаром», «поле сил» которого «приводится не к равнодействующей силе», вследствие чего «образуются неуравновешенные моменты вращения и возникает деформация оболочек». Авторами утверждается правильность «вихревого» подхода Р. Декарта к проблеме образования «планет и спутников из единого протооблака». При этом «структура положительных и отрицательных аномалий» силы тяжести на Земле «такова, что их природу можно интерпретировать как эффект спирального закручивания северного полушария относительно южного», что, например, находится в полном соответствии с концепцией правозакрученного вихря, разработанной на основе геологических данных [Тверитинов, Тверитинова, 2006; Тверитинова, Викулин, 2005], и вихревым подходом, разрабатываемым в работе [Дмитриевский и др., 1993]. В работе [Ферронский С.В., Ферронский В.И., 2007] показывается, что предлагаемая теория, в принципе, имеет выход на объяснение геологических пульсаций и тектонических перестроек. При этом такие явления, как «колебания земной коры и землетрясения, горообразование и вулканизм ... имеют общую природу», которая связана с упругим и «гравитационным взаимодействием масс» Земли.

Как видим, авторами, среди прочего, обращается внимание на первостепенную важность для геодинамики концепций гравитации и моментного взаимодействия между различными оболочками Земли.

2008 г. Выход в свет монографии В.С. Пономарева [2008], основное содержание которой сводится к доказательству утверждения, что «геологическая среда может обладать собственным энергетическим потенциалом», который обеспечивается способностью «горных пород и твердых тел вообще механически связывать, накапливать и длительно хранить запасы упругой энергии». Явление энергонасыщенности, отмечает автор, не является новым, оно, фактически, использовалось многими исследователями при разработке различных современных концепций: «об автокаталитическом распаде поля напряжений, самопроизвольном разрушении» горных пород, «нелинейных эффектах при структурообразовании, «бескорневой» тектонике, структурной самоорганизации среды и др.». Явление напряженного состояния земной коры, установленное в серии публикаций Л.Н. Рыкунова с соавторами в 1979–1985 гг. [Николаев и др., 1985], также доказывает эффект энергонасыщенности геологической среды.

В работе [Пономарев, 2008] обращается особое внимание на то, что «явление энергонасыщенности среды по своей природе противоречит ... фундаментальным гипотезам механики сплошных сред». По сути, к такому выводу приходят, как мы видели выше, и авторы работ [Ферронский С.В., Ферронский В.И., 2008; Lomnitz, 1970, 1990; Lomnitz, Castanos, 2006].

Таким образом, одним из фундаментальных выводов двух цитированных выше монографий [Пономарев, 2008; Ферронский С.В., Ферронский В.И., 2007] является следующее утверждение: «Соответствие между (геодинамической – А.В.) теорией и (геофизическим – А.В.) экспериментом может быть достигнуто ценой отказа от классической модели сплошной среды», «одна из основных гипотез» которой «–принцип Коши – предполагает эквивалентность действия всех внутренних сил, приложенных к элементарной площадке, действию их равнодействующей, приложенной к ее центру. ... Для учета этих факторов необходимо отказаться от гипотезы Коши и учитывать внутренние пары сил (собственные моменты Л.И. Седова). Это приводит к необходимости рассмотрения представительного объема среды не как материальной точки, а как более сложного объекта, обладающего дополнительными внутренними степенями свободы и способностью к микродеформации» [Потапов, 2005].

2009 г. Выход в свет учебного пособия «Физика Земли и геодинамика» [Викулин, 2009], в котором, среди прочего, автором обращается внимание на то, что в последние десятилетия представления о физике Земли дополняются, по сути, достижениями геодинамики. Подтверждением тому является стереотипное переиздание в 2006 г. классической монографии В.А. Магницкого [1965, 2006]. Это связано в основном с «насыщением» наших знаний как о физическом состоянии глубинного вещества Земли, так и о физике протекающих внутри нее процессов, с одной стороны, и с новым всплеском интереса к проблемам геодинамики в связи с поиском новой, взамен глобальной тектоники плит, парадигмы – с другой.

2. МОМЕНТНАЯ ПРИРОДА ГЕОСРЕДЫ

Из проведенного выше обзора литературы можно сделать вывод о том, что в соответствии с современными представлениями геологическая (геофизическая) среда является блоковой («кусковой»), самоорганизованной, нелинейной, энергонасыщенной, содержащей вихревые структуры разных размеров (10^2 – 10^4 км). Строение и свойства такой среды в значительной степени должны определяться вращением Земли вокруг своей оси. Блоки и плиты поворачиваются. Их вращение происходит под действием *собственных моментов* количества движения, а не в соответствии с теоремой Эйлера, согласно которой любое перемещение вдоль поверхности сферы равносильно повороту на некий угол – т.е. сначала перемещение, затем поворот. Такие противоречивые и, на первый взгляд, даже невозможные свойства позволяют, тем не менее, предложить модель геосреды – модель Пейве–Седова–Садовского. Согласно такой модели энергонасыщенность среды и самоорганизация слагающих ее «элементарных» объемов определяются ее блоковым строением с характерными вихревыми движениями (геологическими структурами). Процесс самоорганизации является следствием моментного упругого взаимодействия блоков и плит между собой и осуществляется посредством тектонических (медленных и быстрых [Быков, 2005]) волн.

Наблюдаемое в науках о Земле в течение последних 10 лет стремительное повышение интереса к проблеме геологических структур с вращениями [Вихри..., 2004; Ротационные процессы..., 2007] происходит на фоне «неуспехов» новой глобальной тектоники [Пуцаровский, 2005; Ротационные процессы..., 2007]. Имеет место очевидный процесс поиска новой тектонической парадигмы, в основе которого заложен принцип перехода от «линейки» к «циркулю», связанный с моментной природой геологической среды [Викунин, 2008, 2009; Викунин, Тверитинова, 2007, 2008; Тверитинова, Викунин, 2005].

Ниже покажем, что, взяв за основу гипотезу Пейве–Седова–Садовского о моментной природе блоковой геосреды, можно будет объяснить и увязать между собой большое количество геодинамических явлений.

3. МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ

Физическая составляющая геодинамики – тектонофизика – основана с целью построения физической теории тектонического процесса [Гзовский, 1975]. При этом «стержневой идеей» тектонофизического анализа «является представление о взаимосвязи трех основных категорий» геологии «1) геологической среды (объект), 2) тектонических сил и напряжений (воздействие на объект), 3) тектонических движений и деформаций (следствие воздействия на объект) по аналогии с фундаментальными законами физики» [Гончаров и др., 2005]. Такой подход к тектонофизическим и, в целом, геодинамическим задачам – «по аналогии», при котором

никак не предусматривается «обратное» специфическое влияние конкретных геодинамических условий на физику изучаемого процесса, по-видимому, полностью исчерпал себя. Максимум такого «по аналогии» подхода к геодинамическим (и тектонофизическим) задачам, не учитывающего возможную физическую специфику конкретного геодинамического процесса, – это метод В.А. Магницкого [1965, 2006], при котором физика всех явлений, протекающих в недрах Земли, считается заранее известной. Такой подход применим на самых первых стадиях изучения, так как позволяет обрисовать только достаточно общие контуры явлений, без их возможной геодинамической спецификации. Примеров таких геодинамических спецификаций, придающих геосреде новые физические свойства, можно привести много [Проблемы геофизики..., 2003; Пономарев, 2008; и др.]. Один из них – энергонасыщенность геологической среды – подробно обсуждался выше. Результат: принципиальная неприменимость существующих моделей механики сплошной среды для реальной геологической среды [Пономарев, 2008].

Аналогичные ситуации в истории науки встречались неоднократно, например, в физике, когда для осмысления гелиоцентрической системы приходилось преодолевать уже в течение полутора тысяч лет сложившийся «здоровый смысл» античных представлений геоцентрической системы [Владимиров, 2009].

С целью преодоления инерции такого «здорового смысла» необходимо при анализе исходного материала использовать достаточно общие подходы. В механике, например, используется принцип наименьшего действия. Тогда, «записав с помощью определенных формальных правил функцию Лагранжа, из нее ... можно получить всю необходимую информацию о системе: уравнения движения, законы сохранения и все прочее» [Владимиров, 2009]. Правда, при этом надо быть готовым к тому, что получаемый теоретически количественный результат, удовлетворяющий экспериментальным наблюдениям, не всегда может увязываться со «здоровым смыслом». Например, Р. Фейнман говорил: «Но, мне кажется, я смело могу сказать, что квантовой механики никто не понимает» [Владимиров, 2009]. Но прекрасно научились ее использовать [Гелл-Манн, 1984]! С другой стороны, в соответствии со «здоровым смыслом» в рамках современных представлений о свойствах твердого тела невозможно представить существование в геофизической (твердой) среде вихревых структур. Незнание физики вследствие непонимания геодинамических особенностей, на наш взгляд, и объясняет современный уровень состояния вихревой геодинамики, который, по сути, соответствует описанию Ли Сыгуана на конец 1920-х гг.

При исследованиях систем, состоящих из достаточно большого количества объектов (например, тектонических плит, очагов землетрясений, вулканов и их извержений и др.), как известно [Ландау, Лифшиц, 1964], «появляются новые своеобразные закономерности», которые «ни в какой степени не

могут быть сведены к чисто механическим закономерностям. Их специфичность проявляется в том, что они теряют всякое содержание при переходе к механическим системам с небольшим числом степеней свободы». Именно поэтому для исследования таких статистических систем разработана специальная концепция, получившая название *фазового пространства*. Каждая точка такого пространства соответствует определенному состоянию анализируемой системы. Таким образом, исследование состояния статистической системы сводится к анализу траекторий движения точек в фазовом пространстве. Закономерное распределение точек в фазовом пространстве описывается функцией статистического распределения, которая имеет вероятностную природу.

Применительно к сейсмостатистическим исследованиям нами был разработан метод, в основе которого заложены представления о фазовом пространстве [Викулин, 2003]. О физических закономерностях такой статистической системы можно судить по свойствам траекторий, вдоль которых движется система в фазовом пространстве. Например, существование замкнутой траектории на плоскости с осями число землетрясений – продолжительность временных интервалов между ними определяет периодические свойства статистической системы. Именно в рамках такого статистического подхода к геофизическим задачам естественным образом могут быть учтены, в том числе, и специфические особенности геодинамического процесса, связанные с существованием у «элементарных» макрообъемов геосреды (блоков и плит) собственных моментов количества движения, аналогом которых в статистической физике является спин. Метод фазового пространства уже используют при геологических исследованиях [Захаров, 2002; Ключевский, 2008; Синергетика геосистем, 2007].

4. Два типа взаимодействия блоков геосреды

С целью изучения геодинамических процессов, вулканической активности и ее взаимосвязи с сейсмическим процессом была создана электронная база, включающая данные о сильных 12393 землетрясениях, произошедших в течение последних 4.1 тыс. лет, и 6499 извержениях 630 вулканов мира за 12 тыс. лет до 2008 г. включительно [Викулин и др., 2007]. Сведения о вулканических извержениях представлены в формате данных об очагах землетрясений: даты, координаты очагов и вулканов и «энергетические» характеристики: для землетрясений – магнитуда M , для извержений – объем изверженного ювенильного материала W , значения которого $W = 1, 2, 3, \dots, 7$ согласно шкале, принятой в Smithsonian Institution, составляют $10^{4-5}, 10^6, 10^7, \dots, 10^{11} \text{ м}^3$ соответственно.

1. Распределения чисел землетрясений и извержений в базе по их энергетическим характеристикам оказались однотипными – в соответствии с графиками повторяемости с «наклонами» 0.9 ± 0.3 и 0.5 ± 0.1 [Викулин, 2009].

2. Анализ показал, что каждое из распределений

однородных по магнитудной классификации северо-западно-тихоокеанских землетрясений XX века – пространственное (sp), временное (t), магнитудное (энергетическое, m) – имеет особенности в окрестностях двух точек:

$$M_{1:sp,t,m} = 7.7 \pm 0.2, \quad M_{2:sp,t,m} = 5.3 \pm 0.1, \quad (2)$$

что физически определяет два типа взаимодействия между их очагами. Первый тип взаимодействия соответствует «отталкиванию» очагов сильнейших $M \geq M_{1,sp}$ землетрясений (афтершоковых областей или сейсмических брешей первого типа), что выражается в их непересечении в течение сейсмического цикла [Федотов, 2005], продолжительность которого для северо-западной окраины Тихого океана составляет [Викулин, 2003]:

$$T_{sp} = 190 \pm 40 \text{ лет}. \quad (3)$$

Свойство непересечения очагов достаточно сильных землетрясений установлено для всех сейсмоактивных регионов мира. Второй тип взаимодействия соответствует взаимному «притяжению» сейсмических дыр сильных $M \geq M_{2,sp}$ землетрясений (зон молчания, зон затишья и др. или сейсмических брешей второго типа, существование которых установлено для всех сейсмоактивных регионов мира), их «втягиванию» внутрь очага сильнейшего землетрясения [Викулин, Журавлев, 1987].

3. Рассчитанные для разных совокупностей землетрясений изолинии значений доверительной вероятности на (фазовой) плоскости с осями магнитуда M ($3 \leq M \leq 8$) – продолжительность временного интервала ΔT (1 мес. $\leq \Delta T \leq 300$ лет) «стягиваются» к замкнутой линии, определяющей характерный период сейсмического процесса:

$$T_t = 230 \pm 60 \text{ лет}. \quad (4)$$

Анализ землетрясений и извержений вулканов всей мировой базы данных показал существование следующих наборов сейсмических (c) и вулканических (v) периодов [Викулин, 2009]:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} T_{0,c} &\approx 116 \pm 1, \quad T_{0,c} \approx 195 \pm 6, \\ 2T_{0,c} &\approx 388 \pm 4, \quad 4T_{0,c} \approx 786 \pm 9 \text{ лет}; \end{aligned} \quad (5.1)$$

$$\begin{aligned} T_{0,v} &\approx 198 \pm 17, \quad 2T_{0,v} \approx 376 \pm 12, \\ 4T_{0,v} &\approx 762 \pm 17 \text{ лет}. \end{aligned} \quad (5.2)$$

Из соотношений (5.1) и (5.2) видно, что, во-первых, «структура» обоих рядов однотипная – равны между собой и «основные тона» $T_{0,c}$ и $T_{0,v}$, и их «гармоники». Существование только «четных» гармоник, очевидно, соответствует вполне определенной симметрии тектонических поясов планеты – их «замкнутости» друг на друга. Во-вторых, справедливо равенство:

$$T_{0,c} = T_{0,v} = T_t, \quad (6)$$

определяющие значение единого периода для обоих (сейсмического и вулканического) временных рядов – основного периода геодинамического процесса, протекающего в пределах тектонических поясов планеты.

4. Близость особых «пространственных» и «временных» значений магнитуд $M_{1,sp} \approx M_{1,t}$ (2) и продолжительностей характерных «пространственных» (3) и «временных» периодов $T_{sp} \approx T_t$ (3), (4) определяет и объясняет существование пространственно-временных закономерностей в распределении и очагов землетрясений, и извержений вулканов.

На рис. 3 и 4 на плоскостях с осями расстояние вдоль Пацифики L (в которое пересчитывались географические координаты; за начало отсчета $L = 0$ принят вулкан Бак Айленд (Антарктика), расположенный на юго-западе Пацифики; общая протяженность окраины до вулкана Сьерро Азул (Чили), таким образом, составила $L_{max} = 41400$ км) – время t представлены данные о типичных цепочках миграции очагов землетрясений и вулканических извержений соответственно.

Определены параметры «средних» миграционных цепочек для разных «энергетических» диапазонов $M \geq 7.0, 7.5, 8.0, 8.5$ и объемов изверженного материала $W \geq 4, 5, 6$. Полагая продолжительность и протяженности цепочек и числа событий в цепочках независимыми друг от друга параметрами, можно показать, что вероятности существования цепочек в каждом из диапазонов близки к единице. Другими словами, миграция сейсмической и вулканической активности является закономерным свойством геодинамического процесса.

5. Достаточно полно в настоящее время исследованы закономерности миграции очагов землетрясений. Все данные о скоростях миграции очагов землетрясений в пределах тихоокеанской окраины собраны в работах [Викулин, 2003, 2009; Осипова,

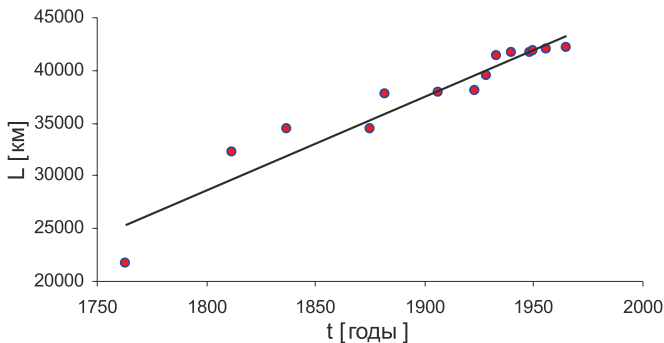


Рис. 3. Миграционная цепочка очагов землетрясений, характерная для диапазона $M \geq 7$. Наклон прямой соответствует скорости миграции очагов землетрясений в цепочке $V = 89$ км/год.

Fig. 3. Migration chain of earthquake foci, typical of $M \geq 7$ range. The slope of the straight line corresponds to the migration velocity of the earthquake foci in the chain, $V = 89$ km per year.

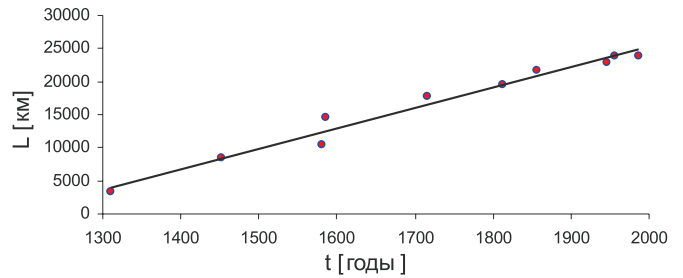


Рис. 4. Миграционная цепочка вулканических извержений, характерная для диапазона $W \geq 4$. Наклон прямой соответствует скорости миграции извержений вулканов $V = 31$ км/год.

Fig. 4. Migration chain of volcanic eruptions typical of $W \geq 4$ range. The slope of the straight line corresponds to the migration velocity of the volcanic eruptions, $V = 31$ km per year.

2008] и представлены на рис. 5, из которого видно, что скорости миграций землетрясений разбиваются на два поля точек. Одно из них (I) связывает магнитуды землетрясений M_1 с их скоростями миграции V_1 вдоль всей окраины Тихого океана – глобальная миграция:

$$M_1 \approx 2LgV_1, \quad V_{1,max} = 1-10 \text{ см/с}, \quad M_{1,max} \geq 8. \quad (7)$$

Второе (II) поле связывает магнитуды форшоков и афтершоков, мигрирующих в очагах сильных землетрясений, со скоростями локальной миграции:

$$M_2 \approx LgV_2, \quad V_{2,max} = V_s \approx 4 \text{ км/с}, \\ M_{2,max} \approx 8.0 - 8.5. \quad (8)$$

Здесь $V_{1,max}, V_{2,max}$ – максимальные значения скоростей миграции очагов землетрясений в областях предельных значений их магнитуд $M_{1,max}$ и $M_{2,max}$ соответственно. При соотношении между магнитудой землетрясения M и размером его очага L : $\lg L = 0.4 \cdot M - 1$ [Ризниченко, 1985], и сброшенной в его очаге упругой энергией E и магнитудой M : $M \approx 1.8 \cdot \lg E$ (соотношение Гутенберга-Рихтера), равенства (7) и (8) могут быть переписаны в виде:

$$LgV_1 \approx 0.8 \cdot \lg V_1, \quad E_1 \approx V_1^{3.6} \approx V_1^4, \quad (7.1), (7.2)$$

$$LgV_2 \approx 0.4 \cdot \lg V_2, \quad E_2 \approx V_2^{1.8} \approx V_2^2. \quad (8.1), (8.2)$$

6. Исследовались скорости миграции сильных ($M \geq 5$) форшоков и афтершоков сильнейших землетрясений, очаги которых имели протяженность около 1000 км и более и были ориентированы в широтном (землетрясения вблизи Алеутских островов 1957 г., $M_W = 8.8$, 1965 г., $M_W = 8.7$, и Аляски 1964 г., $M_W = 9.0$) и долготном (Чили, 1960 г., $M_W = 9.5$, Суматра, 2004 г., $M_W = 9.0$) направлениях [Викулин, 2009; Викулин, Викулина, 2007]. Оказалось, что скорость миграции таких форшоков-афтершоков в очагах долготных землетрясений не зависит от направ-

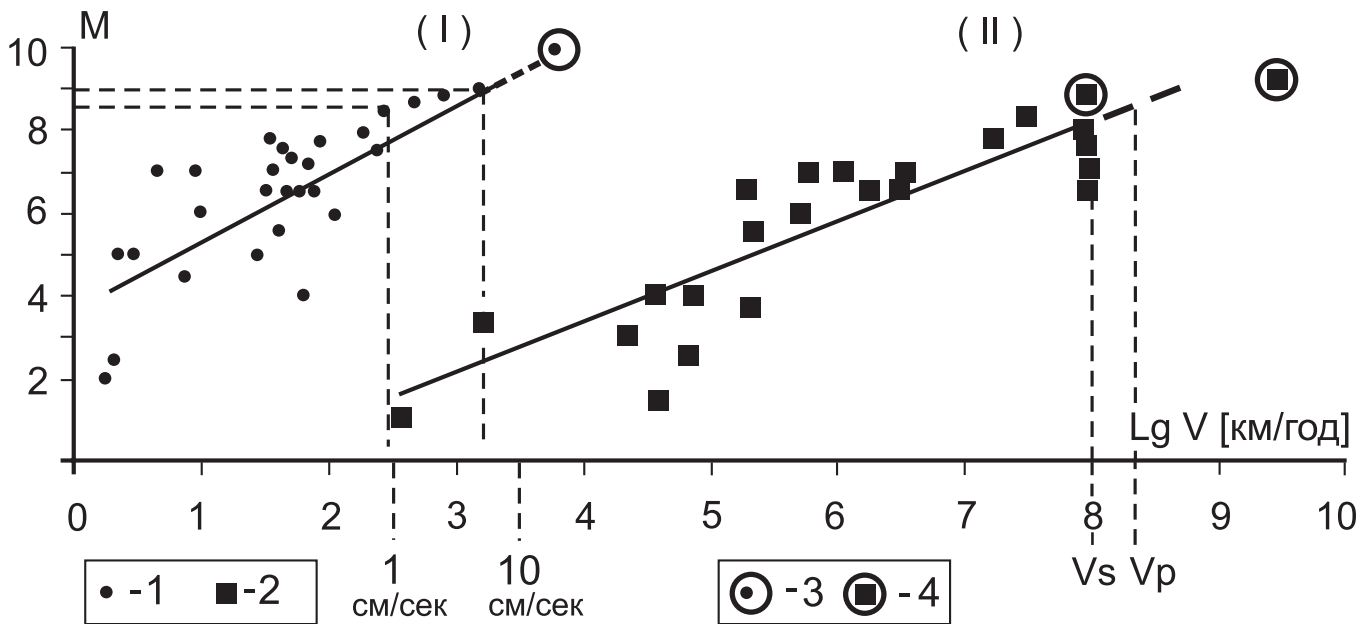


Рис. 5. Значения скоростей миграции тихоокеанских землетрясений и определенные по ним «корпускулярные» зависимости $M(LgV)$ в соответствии с [Викулин, 2009, с 296]. 1, 2 – данные о миграции очагов землетрясений вдоль окраины Тихого океана (глобальная миграция) и миграции форшоков и афтершоков в очагах сильных землетрясений (локальная миграция), соответственно; 3 – скорости миграции сильнейших землетрясений–дуплетов с $M = 8.1–8.7$ в 1897–1901 гг. вдоль окраины Тихого океана; 4 – скорости, соответствующие миграции главных толчков в дуплетах 4.11.1952, Камчатка, $M_W = 9.0$, и 13.10.1963, Курилы, $M_W = 8.7$ [Викулин, Чернобай, 1986а, 1986б]. (I) и (II) – зависимости магнитуды землетрясения от скорости «глобальной миграции» их очагов вдоль окраины Тихого океана $M_1(LgV_1)$ – (7) и от скорости «локальной» миграции форшоков и афтершоков в очагах сильных землетрясений $M_2(LgV_2)$ – (8), соответственно, определенные методом наименьших квадратов. Диапазон 1–10 см/с определяет максимальное значение глобальных скоростей миграции $V_{1,max}$ (I), $V_p \approx 8$ км/сек и $V_s \approx 4$ км/сек, продольная и поперечная сейсмические скорости, соответственно, определяют диапазон максимальных скоростей локальной миграции $V_{2,max}$.

Fig. 5. Velocities of migration of earthquakes in the Pacific region and corresponding «corpuscular» relationships $M(LgV)$ according to [Vikulin, 2009, page 296]. 1, 2 – data on migration of earthquake foci along the Pacific ocean margin (global migration) and migration of foreshocks and aftershocks in foci of strong earthquakes (local migration), correspondingly; 3 – migration velocities of strong doublet earthquakes with $M = 8.1–8.7$ in 1897–1901 along the Pacific ocean margin; 4 – velocities corresponding to migration of main shocks in doublet earthquakes of 04 November 1952 at Kamchatka ($M_W = 9.0$) and 13 November 1963 at the Kuril Islands ($M_W = 8.7$) [Vikulin, Chernobai, 1986a, 1986b]. (I) and (II) – relationships between the earthquake magnitude and the velocity of «global migration» of their foci along the Pacific ocean margin $M_1(LgV_1)$ – (7), and from the velocity of «local» migration of foreshocks and aftershocks in focal zones of strong earthquakes $M_2(LgV_2)$ – (8), correspondingly; they are defined by the least-square method. The range from 1 to 10 cm/s defines the maximum value of global migration velocities, $V_{1,max}$ (I), $V_p \approx 8$ km/sec and $V_s \approx 4$ km/sec; longitudinal and transverse seismic velocities, correspondingly, define the range of maximum velocities of local migration $V_{2,max}$.

ления миграции – с севера на юг или, наоборот, с юга на север. В широтных же очагах скорость миграции зависит от направления и в направлении с запада на восток превышает такую же скорость на величину, равную эффекту Доплера, связанному с вращением Земли вокруг своей оси.

Таким образом, миграция очагов землетрясений (и извержений вулканов), по сути, является волновым процессом.

7. Анализ полученных и собранных Т.Ю. Тверитиновой данных о размерах плит и скоростях их движения вдоль границ за последние 150 млн лет позволил получить следующие результаты [Викулин, Тверитинова, 2008]. По совокупности всех имеющихся в нашем распоряжении данных ($N=61$) о протяженностях зон $650 < L$ [км] < 18000 и скоростях $5 < V$ [мм/год] < 112 субдукции, рифтинга и спрединга выявляются две зависимости $L_{1,2}(V_{1,2})$:

$$Lg L_1 \text{ [км]} (\pm 0.3) = (0.43 \pm 0.15) \cdot Lg V_1 \text{ [мм/год]} + (2.9 \pm 0.5), \quad 0 < \tau_1 \leq 5 \text{ млн лет}, \quad (9)$$

$$Lg L_2 \text{ [км]} (\pm 0.33) = (0.7 \pm 0.3) \cdot Lg V_2 \text{ [мм/год]} + (3.17 \pm 0.26), \quad 5 < \tau_2 \leq 100 \text{ млн лет}. \quad (10)$$

Здесь $\tau_{1,2}$ – продолжительности определенных по номерам магнитных аномалий [Харленд и др., 1985; Хейцлер и др., 1974] «относительных» временных интервалов, по которым устанавливались зависимости (9) и (10).

Отметим, что корреляционная зависимость $Lg L \approx Lg V$, близкая соотношению (10), была получена в работах [Айзекс и др., 1974; Жарков, 1983; Морган, 1974] для процессов спрединга и субдукции. Зависимость $V \approx L^3$, или $Lg L \approx 0.33 \cdot Lg V$, определяющая самосогласованную активизацию разломов Цен-

тральной Азии и близкая соотношению (9), была получена в работе [Шерман, Горбунова, 2008], обобщающей результаты многолетних целенаправленных полевых и экспериментальных исследований, представленных в обстоятельных монографиях [Семеновский, 2003; Шерман и др., 1992, 1994].

Из самых общих соображений следует, что существование зависимости $L(V)$ является принципиальным моментом, по сути, определяющим физику механизма перемещения тектонических плит вдоль поверхности Земли. Более того, существование зависимости между такими векторными величинами, однозначно определяющими величину энергии движущейся плиты, указывает на моментную природу тектонического процесса [Викунин, Тверитинова, 2008]. Тогда, полагая, что при «малых» временах в момент зарождения плиты увеличение ее размеров происходит «со всех сторон», а при больших – с «одной стороны» («работают» соотношения (9) и (10)), для величин энергий моментного тектонического процесса, соответствующих этим предельным механизмам, получаем следующие соотношения [Викунин, Тверитинова, 2007]:

$$E_1 \approx V_1^{2+3}, \quad (9.1)$$

$$E_2 \approx V_2^{4+5}. \quad (10.1)$$

8. Полученные результаты показывают, что движение и блоковой геофизической среды («кусковатой» А.М. Садовского – Л.И. Седова: (7), (8)), и разломно-блоковой геологической среды (А.В. Пейве – Л.И. Седова: (9), (10)) описывается одинаковыми уравнениями как в «моментном» $L(V)$: (7.1), (8.1); (9), (10), так и в «энергетическом» $E(V)$: (7.2), (8.2); (9.1), (10.1) представлении.

По терминологии А.С. Давыдова [1982], первый тип взаимодействия – энергетический (7.2), (10.1) – соответствует солитонам (медленным тектоническим волнам [Быков, 2005]), второй – моментный (8.2), (9.1) – экситонам (быстрым тектоническим волнам [Быков, 2005]). При этом предельное значение скорости

$$V_{1,\max} = (1 \div 10) \text{ см/с}, \quad (11)$$

по сути, является характерной скоростью, определяющей физику движения геосреды в понимании А.В. Пейве [1961], Л.И. Седова [1973], М.А. Садовского [1984; Садовский и др., 1987; Садовский, Писаренко, 1991]. Значения скоростей, по порядку величины близкие $V_{1,\max}$, в геофизике связывают с процессом, известным как крип.

5. Модель движения блоковой геофизической среды

Геофизическая (М.А. Садовского) и геологическая (А.В. Пейве) среды, по определению, являются вращающимися. Значение и направление угловой скорости не зависят от выбора положения начала координат, к которому может быть отнесено враще-

ние 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, по сути, – геосредой в смысле А.В. Пейве – Л.И. Седова – М.А. Садовского. Величины моментов блоков и плит в такой (блоковой вращающейся) среде, очевидно, не должны зависеть от их размеров [Викунин, 2009].

Движение элементарного объема геосреды рассмотрим на примере блока, имеющего шаровую форму.

1. В рамках классической теории упругости с симметричным тензором напряжений [Ландау, Лифшиц, 2003] была поставлена и аналитически решена задача о поле напряжений в твердом теле, вращающемся с угловой скоростью Ω вокруг упругосвязанного с ним небольшого, поворачивающегося под действием внутренних источников макрообъема V [Викунин, 1990; Викунин, Иванчин, 1997, 1998; Викунин, 2006]. Основная идея решения такой задачи заключается в том, что когда блок упруго сцеплен с окружающей его средой (матрицей), изменение за счет внутренних источников направления момента импульса макрообъема приводит к появлению вокруг него упругих напряжений, которые в силу законов сохранения имеют момент силы. Эта идея соответствует известному положению в теории вихрей [Сэффмэн, 2000]: «завихренность пропорциональна моменту количества движения частиц».

Смысл, который мы вкладываем в понятие «собственный момент блока», наиболее близок «собственному моменту количества движения конечного объема сплошной среды» по Л.И. Седову [1973]. Наш подход, при котором упругое поле вокруг макрообъема (блока) «наследует» его собственный момент (циркуляцию) в принципе отличается от подходов других авторов. Они либо не учитывают вращения Земли [Садовский, 1985; Курленя, Опарин, 2000; Гольдин, 2003], либо учитывают формально, в рамках моментной теории упругости [Николаевский, 1995; Курленя, Опарин, 2000; Xie Xin-Sheng, 2004; Быков, 2005]. Отличие нашей ротационной модели от континуума Коссера, наиболее часто применяющегося для объяснения влияния ротации планеты на геофизические процессы, заключается в том, что блоки геофизической среды не просто имеют ротационные степени свободы, они имеют собственный момент, который в случае вращения среды и приводит к целому ряду интересных специфических следствий.

Определялось поле упругих напряжений \mathbf{U} , возникающее в бесконечной среде, вращающейся с угловой скоростью Ω 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 . Решение для момента силы упругого поля \mathbf{K} , направленного перпендикулярно плоскости его поворота, величины упругой

энергии поля W , поля смещений U и напряжений σ в сферической системе координат (r, θ, φ) с центром $r = 0$ в блоке R_0 для области $r \geq R_0$ получено в виде:

$$\begin{aligned} K &= -6\pi^2 \Omega R_0^4 \sqrt{\frac{\rho}{15G}} \sin \beta / 2, \\ W &= \frac{16}{15} \pi \rho \Omega^2 R_0^5 \sin^2 \beta / 2, \\ U_r = U_\theta &= 0, \\ U_\varphi &= \Omega R_0^4 r^{-2} \sqrt{\frac{\rho}{15G}} \sin \theta \sin \beta / 2, \\ \sigma_{r\varphi} = \sigma_{\varphi r} &= \frac{3}{2} \Omega R_0^4 r^{-3} \sqrt{\frac{\rho G}{15}} \sin \theta \sin \beta / 2. \end{aligned} \quad (12.1)–(12.4)$$

Остальные компоненты напряжений равны нулю.

При параметрах модели: плотности среды $\rho = 3 \text{ г/см}^3$, модуле 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 $R_0 = 100 \text{ км}$, соответствующем очагу землетрясения с магнитудой $M \approx 8$, из соотношений (12.1)–(12.4) получаем: $U \approx 10 \text{ м}$, $\sigma \approx 100 \text{ бар}$, $W \approx 10^{16+18} \text{ Дж}$, $K \approx 10^{28+30} \text{ дин·см}$, которые по порядку величины близки реально регистрируемым при землетрясениях с $M \approx 8$ смещениям, сброшенным напряжениям, выделившейся упругой энергии и сейсмическому моменту соответственно. Все эти значения достигаются при угле поворота блока (очага землетрясения) $\beta \approx U/R_0 \approx 10^{-4} \text{ рад}$. При продолжительности сейсмического цикла (повторяемости сильнейших землетрясений в одном месте) 100–1000 лет (3), (4) для скорости поворота блока получаем модельную оценку:

$$d\beta/dt \approx 10^{-(4+6)} \text{ град/год}, \quad (13)$$

которая близка определенным инструментально скоростям поворота блоков и микроплит (1).

Выражение в (12.2) можно переписать в виде:

$$W = 2I\Omega^2 \sin^2 \beta / 2 = 4W_0 \sin^2 \beta / 2, \quad (14)$$

где $I = \frac{8}{15} \pi \rho R_0^5$ – момент инерции однородного с

плотностью ρ шара радиуса R_0 , $W_0 = \frac{1}{2} I \Omega^2 = 10^{25}$

Дж – кинетическая энергия блока. Для «среднестатистического» ($\beta \approx 10^{-4} \text{ рад}$) очага землетрясения с $M \approx 8$ величина ротационной упругой энергии, созданной вокруг него, составит:

$$W \approx 10^{-8} W_0 \approx 10^{17} \text{ Дж}. \quad (15)$$

Таким образом, предложенная модель накопления упругих напряжений вокруг одного поворачивающегося блока является энергетически обоснованной.

2. Энергия двух 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 слагаемые в правой части в выражении для упругой энергии есть собственные упругие энергии, каждая из них вычисляется на основании (12.2). Третье слагаемое определяет выражение для энергии взаимодействия первого и второго блоков друг с другом $W_{\text{int}} = 2G \int abdV$. Выражение для энергии взаимодействия W_{int} получаем в виде:

$$W_{\text{int}} = \frac{3}{2} \pi \rho \Omega^2 R_{01}^4 R_{02}^4 l^{-3} \cos \phi, \quad (16)$$

где R_{01} и R_{02} – характерные размеры первого и второго блоков, l – расстояние между их центрами, ϕ – угол между их моментами сил.

Момент силы K_{int} , обусловленный энергией взаимодействия, определяется путем дифференцирования выражения для W_{int} (16) по углу ϕ :

$$K_{\text{int}} = -\frac{3}{2} \pi \rho \Omega^2 R_{01}^4 R_{02}^4 l^{-3} \sin \phi. \quad (17)$$

3. Отношение энергии взаимодействия W_{int} (16) к собственной энергии блока W (12.2) в случае равновеликих блоков определяется равенством:

$$\frac{W_{\text{int}}}{W} = \frac{45}{32} \left(\frac{R_0}{l} \right)^3 \frac{\cos \phi}{\sin^2 \beta / 2} = \delta, \quad (18)$$

откуда видно, что максимальное ($\cos \phi = 1$) расстояние Λ , на котором энергия взаимодействия W_{int} будет по порядку величины близка собственной энергии W блока $\delta = 1$, определится из выражения:

$$\Lambda \approx 2\beta^{-2/3} R_0 \approx (10^2 \div 10^3) R_0, \quad (19)$$

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

Из полученного соотношения (19) видно, что упругие поля, создаваемые внутри блоковых вращающихся тел с собственными моментами, распространяются на расстояния, которые на два–три порядка превышают размеры блоков. Другими словами, ротационные упругие поля являются *дальнодействующими*. Такое свойство сеймотектонического упругого поля подтверждается группировкой сильнейших тихоокеанских землетрясений в дуплеты и пары землетрясений с расстояниями вдоль окраины Тихоокеана между очагами в паре от

сотен до десятков тысяч километров [Викунин, 2009; Викунин, Водинчар, 2005] и эффектом удаленных форшоков и афтершоков [Прозоров, 1978, 1984].

Таким образом, окраину Тихого океана, представляющую собой следующие друг за другом очаги сильнейших землетрясений, можно считать совокупностью взаимодействующих между собой «элементарных» блоков с размерами $R_0 = 100$ км. Физически понятно, что только свойство дальнего действия сейсмического процесса может лежать в основе обоснования таких эффектов, как миграции очагов землетрясений, пар землетрясений, удаленных форшоков и афтершоков и др.

4. Рассмотрим одномерную (длина цепочки много больше ее ширины) цепочку поворачивающихся взаимодействующих блоков, расположенную внутри твердого тела, вращающегося с угловой скоростью. Будем полагать, что все блоки равновелики и имеют форму шара радиусом R_0 .

Рассмотрим случай, когда все блоки в цепочке движутся равномерно. В соответствии с полученными выше результатами уравнение для движения блока в цепочке можно записать в виде:

$$I \frac{d^2 \beta}{dt^2} = K_1 + K_2.$$

Здесь β , как и прежде, угол, на который повернулся блок в результате подготовки землетрясения, I – его момент инерции, K_1 – «собственный» момент силы поля упругих напряжений вокруг блока в результате его поворота, значение которого определяется из соотношения (12.1), K_2 – момент силы, отвечающий за взаимодействие рассматриваемого блока с остальными блоками цепочки. Из самых общих соображений ясно, что величина момента K_2 должна быть пропорциональна как упругой энергии рассматриваемого блока, равной $V d^2 \beta / dx^2$, так и упругой энергии, соответствующей всем остальным блокам цепочки. В качестве последней выбираем величину, равную средней линейной плотности упругой энергии цепочки блоков w . Здесь $V = 4 / 3 \pi R_0^3$ – объем блока, x – координата вдоль цепочки. Таким образом, момент силы, отвечающий за взаимодействие рассматриваемого блока с другими блоками цепочки, можно записать в виде: $K_2 = \zeta w V d^2 \beta / dx^2$, где ζ – безразмерный коэффициент, характеризующий однородность цепочки. Для тихоокеанского пояса, являющегося достаточно однородным, примем $\zeta = 1$.

Окончательно уравнение движения для блока с координатой x в момент времени t в безразмерных координатах $\xi = k_0 x$, $\eta = c_0 k_0 t$ можно записать в виде:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial \xi^2} - \frac{\partial^2 \theta}{\partial \eta^2} = \sin \theta, \quad (20)$$

где $\theta = \beta / 2$. Волновое число k_0 и скорость c_0 , харак-

теризующие цепочку блоков (сейсмический процесс, протекающий в цепочке), соответственно определяются из следующих соотношений:

$$k_0^2 = \frac{3\pi\Omega}{wV} \left(\frac{3V}{4\pi} \right)^{4/3} \sqrt{\frac{\rho G}{15}}, \quad c_0^2 = wV / I. \quad (21)$$

Уравнение (20) известно как уравнение синус (sin)–Гордона (СГ).

Нелинейные уравнения, в том числе СГ уравнение, в настоящее время достаточно широко используются при решении разного рода задач [Быков, 2000, 2005; Проблемы геофизики..., 2003]. Отличительной особенностью полученного нами СГ уравнения является то, что постоянные k_0 и c_0 (21) оказались зависимыми от угловой скорости вращения тела (Земли).

5. Полученное СГ уравнение (20), как и любое другое синус-Гордона уравнение, имеет много решений. Среди них в технических, физических и геофизических приложениях часто встречаются решения в виде локализованных (уединенных) волн – солитонов (soliton) [Быков, 2000, 2005]. В длинной цепочке блоков, в которых можно не учитывать влияние ее концов (какими являются и сейсмические пояса планеты, в том числе и тихоокеанское кольцо), возможны решения, получившие название экситонов (exiton) [Давыдов, 1982].

Качественная зависимость энергии возбуждения E от скорости распространения V для солитонов (sol, I) и экситонов (ex, II) приведена на рис. 6.

Зависимости для энергий возбуждения солитонов и экситонов, в соответствии с [Давыдов, 1982], удовлетворяют следующим условиям:

$$\begin{aligned} E_{sol} \approx V_{sol}^n, \quad E_{sol} \geq 0, \quad V_{sol} \leq V_0; \quad E_{ex} \approx V_{ex}^p, \\ V_{ex} > V_0; \quad n > p, \end{aligned} \quad (22)$$

где V_0 – характерная скорость процесса, протекающего в цепочке взаимодействующих блоков.

6. В квазилинейном приближении, когда процесс можно отобразить с помощью линеаризованного уравнения СГ, оказывается возможным закон дисперсии для экситонных решений аналитически записать в виде:

$$\omega^2 = \omega_0^2 (1 + \lambda_0^2 / \lambda^2), \quad \lambda_0 = 2\pi c_0 / \omega_0, \quad (23)$$

где ω и λ – частота и длина волны экситона соответственно, ω_0 – собственная частота поворотного движения блока, λ_0 – соответствующая ей длина волны.

Первой характерной особенностью закона дисперсии (23) является его связь с нелинейными свойствами цепочки блоков (геофизической среды, заполняющей сейсмофокальный объем и примыкающую к нему часть земной коры), а не с ее дисперсионной структурой.

Второй отличительной особенностью закона дисперсии (23) является то, что частота распро-

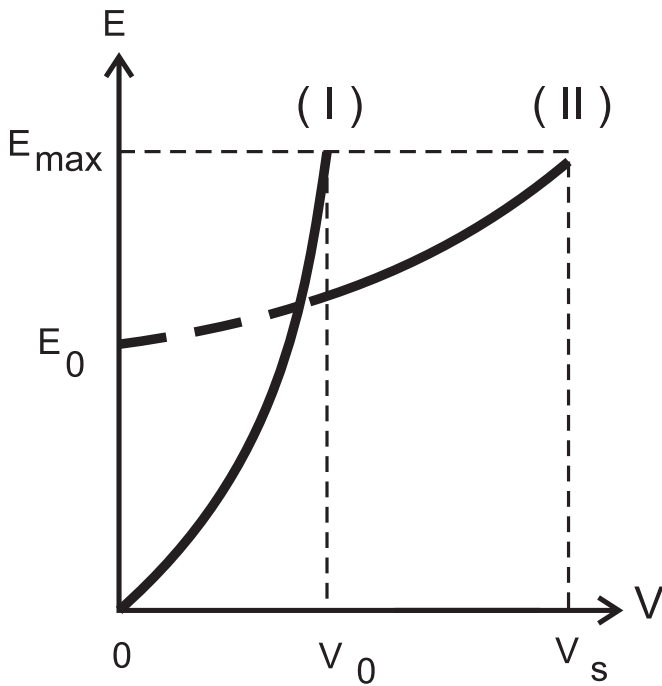


Рис. 6. «Волновые» (в соответствии с [Давыдов, 1982]) представления решений упругих энергий E , сбрасываемых в очагах тихоокеанских землетрясений, как функций скоростей их миграции V . I – солитоны, II – экситоны. V_0 – характерная скорость геодинамического процесса, как максимальная скорость солитонного решения при $M \rightarrow M_{max} = 8.5-9.0$ (рис. 3, I); V_s – скорость поперечных сейсмических волн, как максимальная скорость экситонного решения при максимальных магнитудах форшоков и афтершоков $M \rightarrow M_{max} = 8.3$ [Duda, 1963] (рис. 3, II) [Викунин, 2009, с. 318].

Fig. 6. «Wave» (according to [Davydov, 1982]) solutions of elastic energies E , released in earthquake foci located in the Pacific ocean, as functions of their migration velocities, V . I – solitons; II – excitons; V_0 – typical velocity of the geodynamic process as the maximum velocity of the soliton solution with $M \rightarrow M_{max} = 8.5-9.0$ (see Fig. 3, I); V_s – velocity of transverse seismic waves as the maximum velocity of the exciton solution with maximum magnitudes of foreshocks and aftershocks $M \rightarrow M_{max} = 8.3$ [Duda, 1963] (Fig. 3, II) [Vikulin, 2009, page 318].

страняющихся по цепочке блоков волн всегда выше ω_0 . Физически очевидно, что частота ω_0 достигается при большой длине волны (в пределе $\lambda \rightarrow \infty$), когда все блоки цепочки движутся как единое целое, без ее деформации. Этот случай нулевого экситонного состояния соответствует экстраполяции экситонной зависимости $E_{ex}(V)$ в (22) в область значений скорости $V_{ex} < V_0$:

$$V_{ex} = 0, E_{ex} = E_{min} = E_0 > 0. \quad (24)$$

Показано [Викунин, Кролевец, 2001], что решение (24) соответствует колебанию всей цепочки блоков как целостной структуры с частотой ω_0 , равной частоте колебаний всей сейсмофокальной зоны Тихого океана. Это решение описывает свойства нутации полюса Земли – колебания Чандлера. В рамках такого подхода «расщепление» основной частоты Чандлера на две – широтную и долготную,

соответствующие Гималайско-Альпийскому и Тихоокеанскому тектоническим поясам, было предсказано и подтверждено экспериментальными данными [Vikulin, Krolevets, 2002].

7. По аналогии с обычными упругими волнами (случай тектонического приближения [Николаевский, 1996]), считая длину волны экситона λ_0 равной размеру сейсмофокального блока: $\lambda_0 \approx R_0$, $k_0 \approx 2\pi / R_0$, для значения характерной скорости волнового процесса в цепочки взаимодействующих блоков c_0 получаем следующее теоретическое модельное выражение:

$$c_0^2 = \frac{3\sqrt{15}}{8\pi^2} \Omega R_0 \sqrt{\frac{G}{\rho}} \approx V_R V_S \quad (25)$$

или при принятых выше параметрах модели:

$$c_0 \approx (1 \div 10) \text{ см/с}. \quad (26)$$

Здесь $V_S = \sqrt{G/\rho}$ – поперечная скорость упругих волн, $V_R = \Omega R_0$ – центробежная скорость.

Соотношение численных значений «наклонов» глобальной (7.1) и локальной (8.1) зависимостей (см. рис. 5, I и II соответственно), описывающих миграцию очагов землетрясений, не противоречит такому же соотношению для теоретических «наклонов» (22) солитонной и экситонной зависимостей (рис. 6, I и II соответственно). Теоретическое модельное значение скорости c_0 (26) равно «экспериментально» определенной (рис. 6, зависимость I) предельной скорости глобальной миграции очагов тихоокеанских землетрясений $V_{1,max}$ (7) и, тем самым, является характерной скоростью процесса V_0 (рис. 6):

$$c_0 \approx V_{1,max} \approx V_0. \quad (27)$$

Все эти данные в совокупности позволяют экспериментально установленные и глобальную, и локальную зависимости магнитуд землетрясений от скоростей миграции их очагов считать солитонным и экситонным решениями уравнения СГ (в смысле А.С. Давыдова [1982]), описывающего движение цепочки поворачивающихся геоблоков (20), (21).

Характерную скорость процесса, согласно соотношению (25), с точностью до численного множителя можно представить в виде среднегеометрического произведения двух скоростей: центробежной V_R и упругой V_S . Отсюда и название модели, данное ей авторами [Викунин, Иванчин, 1997, 1998], – ротационно-упругая волновая модель.

8. В рамках ротационно-упругой волновой модели показано, что достаточно сильное землетрясение является результатом взаимодействия соответствующего ему очага – блока земной коры – с тектонической волной циркулярной поляризации, по сути – спиновой волной. Такой теоретический результат подтверждается многочисленными поворотами памятников и отдельных частей зданий в эпи-

центральных зонах сильных землетрясений, «земляными волнами» («горбам»), по сути гравитационными сейсмическими волнами, распространяющимися по поверхности Земли из очагов землетрясений, инструментальными измерениями в различных геофизических полях и геологическими данными [Викулин, 2009]. Такое представление сейсмического момента часто приобретает естественное обоснование в рамках теории твердого тела – как момент силы круговой (винтовой) дислокации.

6. МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ ГЕОСРЕДЫ

Волновые движения, связанные как с сейсмическим и вулканическим процессами в пределах островных дуг и континентальных окраин Тихого океана (а это более 80 % и по числу сильных событий и по их энергетике от всей сейсмичности и всего вулканизма планеты), так и с тектоническим процессом Земли – движением всей совокупности плит, и в моментном и в энергетическом представлении описываются одинаковыми математическими уравнениями и имеют общие физические свойства. При этом механизм «собственного» вращения тектонических плит, фактически подтвержденный проведенными геофизическими исследованиями плит Пасха и Хуан-Фернандос [Международный геолого-геофизический атлас..., 2003], оказался почти очевидным. Действительно, другое представление механизма, в течение 5 млн лет поворачивающего эти микроплиты, расположенные в месте стыка трех больших по размерам плит – Тихоокеанской, Кокос и Антарктической – при их «колебательном» движении с амплитудами до нескольких сотен километров [Маслов, 1986], невозможно. Повторяемость сильных вулканических извержений вдоль окраины Тихого океана и их миграция аналогичны повторяемости сильных землетрясений и миграции их очагов. В периоды региональных катастроф сейсмичность и вулканизм «согласованы» между собой [Мелекесцев, 2005].

Можно принять, что такие волновые сейсмические, вулканические, тектонические (и другие геофизические и геологические) движения в совокупности – геодинамические волны, как и сейсмотектонические ротационные волны, имеют циркулярную поляризацию. Такие геодинамические волны вследствие дальнедействующего характера взаимодействия блоков и плит формируют единое планетарное геодинамическое поле. Другими словами, волновая геодинамика, по сути своей, является ротационной, определяемой в соответствии с (25) величиной угловой скорости вращения Земли вокруг своей оси.

7. МЕХАНИКА И ГЕОЛОГИЯ

(МЕХАНИЗМ НАКАЧКИ УПРУГОЙ ЭНЕРГИИ В ГЕОСРЕДУ)

Анализ большого количества геологических, геофизических, тектонических и других данных показывает (рис. 1, 2, 7, 8), что вихревые геоструктуры играют важнейшую роль в жизни Земли.

Согласно А.В. Лукьянову [1999], «если представить себе тектоническое течение в виде векторного поля скоростей (или перемещений) частиц тектоносферы, то самоорганизация приводит это поле к единому, сплошному, непротиворечивому структурному рисунку», в котором «находят свое место не только неоднородные деформации, но и зоны с ненулевыми дивергенциями и вихрями». Уже почти полвека, как А.В. Пейве отметил [Лукьянов, 1999], что «каждый блок земной коры обладает как бы самостоятельной «движущей силой», заключенной в нем самом». В работе [Слензак, 1972] делается «важный вывод о самостоятельности крупной вихревой системы, как типа тектонической структуры литосферы, который не может быть создан внешними источниками движения в виде дрейфующих материков или смещений по планетарным разломам». Далее «перекрытие вихревых систем способствует образованию систем меньшего размера, соединяя в новые вихри отрезки больших дуг крупных систем» [Слензак, 1972]. При этом «непосредственное изучение пород свидетельствует о формировании вещества», слагающего вихревые системы, «в твердом состоянии на месте и за счет вещества верхней мантии» [Слензак, 1972].

Глобальная вихревая система в пределах северо-западной окраины Тихого океана (рис. 7) соответствует важным особенностям планетарного геодинамического процесса. Действительно, согласно данным работы [Дмитриевский и др., 1993]: «Геометрия рукавов данной тектонической структуры установлена нами по морфоструктурным признакам: спиральная форма северного рукава вихря выражена в конфигурации островной дуги континентальной окраины, а спираль южного рукава определяется геометрией срединно-океанического хребта и линией о-вов Новой Зеландии – Тонга. Данная вихревая система удовлетворительно выражена в глобальной структуре гравитационного поля Земли (модель GEM-9) и в рисунке горизонтальных течений в верхней мантии по данным сейсмической томографии. Интересно, что в центре вихревой системы расположено крупнейшее вздутие геоида, согласно годдардовской (НАСА) модели Земли GEM-9, построенной по спутниковым данным». И такие тектонические структуры (см. рис. 7), согласованные с гравитационными аномалиями и данными сейсмической томографии (рис. 8), следует рассматривать в совокупности с особенностями вулканических проявлений позднекайнозойского возраста. Более того, авторы работы [Дмитриевский и др., 1993] в вихревой западно-тихоокеанской структуре (см. рис. 7) усматривают и более глобальные – галактические – особенности: «Глобальное вращение или течение вещества Земли по спиральным рукавам к центру индо-тихоокеанского вихря на рис. 7 напоминает движение звездных скоплений по рукавам к ядру спиральной галактики».

Проведенный в работах [Викулин, 2008, 2009; Вихри..., 2004; Ротационные процессы..., 2007] анализ движений, наблюдаемых в природе во всем пространственно-временном масштабе от элементарных частиц до галактик и их скоплений, подтвер-

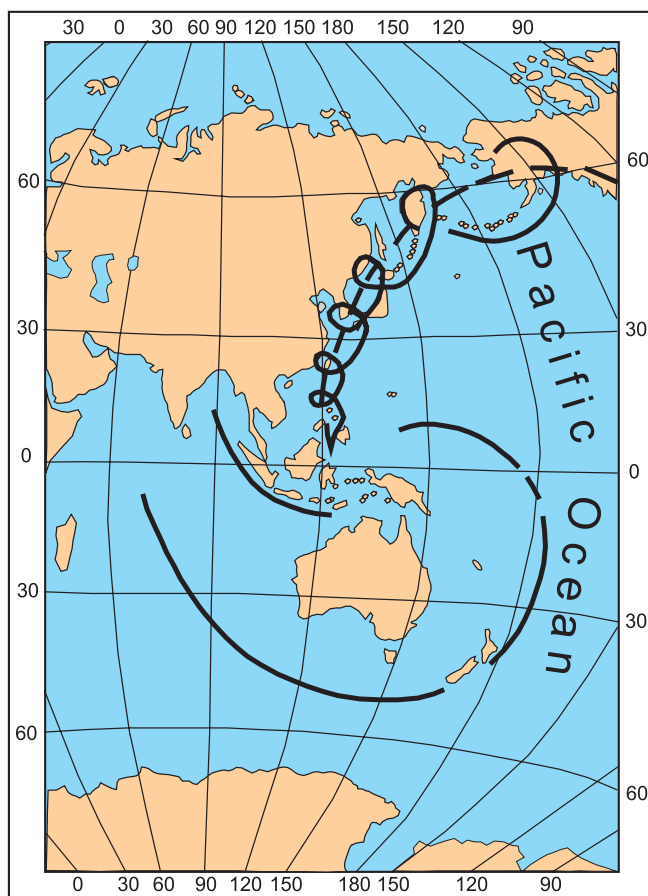


Рис. 7. Глобальная вихревая система Индо-Тихоокеанского региона Земли [Дмитриевский и др., 1993].

Fig. 7. Global vortex system of the Indo-Pacific region [Dmitrievskiy et al., 1993].

ждает саму суть «геотектонических» наблюдений и обобщений А.В. Пейве и А.В. Лукьянова [Лукьянов, 1999] и О.И. Слензака [1972]. Наблюдения и обобщения этих авторов в свете такого анализа и представлений Декарта, Канта-Лапласа, Кельвина и Гамова фактически предписывают структурным элементам геологической среды, на разных пространственно-временных масштабах вращающейся независимо от физического состояния слагающего ее вещества, иметь собственный момент количества движения. На основании этих данных поворотные, закрученные, спиралеобразные (по [Ли Сыгуан, 1958] – вихревые) структуры, их формирование и развитие в пространстве и во времени, взаимосвязь друг с другом («самоорганизация»), по данным Ли Сыгуана [Ли Сыгуан, 1958; Lee, 1928], А.В. Пейве [1961] и А.В. Лукьянова [1999], О.И. Слензака [1972], И.В. Мелекесцева [1979], А.Н. Дмитриевского с соавторами [1993], Е.Г. Мирлина [2006, 2009], сборников [Вихри..., 2004; Ротационные процессы..., 2007; Тектоника и геофизика..., 2002] и других публикаций, являются следствием «собственных» вращательных движений, слагающих геологическую среду блоков, плит и их образований.

Очевидно, что используемое нами понятие «соб-

ственного вращательного движения» в принципе отличается от принятого в глобальной тектонике [Новая глобальная тектоника..., 1974] Эйлерового вращения, определяемого следующими друг за другом действиями: сначала поступательное перемещение вдоль сферической поверхности, в том числе и невращающейся, а затем определение соответствующего такому перемещению угла поворота.

8. ВИХРЕВЫЕ МОМЕНТНЫЕ ДВИЖЕНИЯ КАК ОСНОВА НОВОЙ ПАРАДИГМЫ ГЕОЛОГИИ

Земля и ее фигура постоянно находятся в состоянии стремления к равновесию. В течение всей геологической истории на Земле имели место активные вулканизм, сейсмичность и тектоника – главные геодинамические процессы, определявшие, в том числе, и фигуру Земли. Такие процессы проявлялись разнообразными по своей природе, но едиными по своей сути циклоническими движениями в атмосфере и гидросфере и вихревыми структурами в твердой Земле.

Согласно задаче Дирихле и ее решениям Дедекинда–Римана, равновесная эллипсоидальная форма вращающейся гравитирующей капли обеспечивается вихревыми течениями, возникающими внутри капли и на ее поверхности [Кондратьев, 2003]. Земля на больших (геологических) временных интервалах может рассматриваться как реологическое тело. Поэтому существующие в атмосфере и гидросфере Земли и на ее «твердой» поверхности вихревые движения могут быть представлены как течения, соответствующие решениям задачи Дирихле–Дедекинда–Римана. К такому же классу решений могут быть отнесены и описанные выше циркулярно поляризованные сеймотектонические волны.

Таким образом, блоковая вращающаяся геосреда Пейве–Седова–Садовского и полученные нами для нее волновые упруго-ротационные решения (7.1), (7.2); (8.1), (8.2); (9.1); (10.1); (21); (27) могут рассматриваться как основа такой концепции, в рамках которой *аналитически* могут описываться геодинамические процессы.

Циклонические движения в атмосферах и вихревые «твердые» структуры наблюдаются и на других планетах Солнечной системы. Интенсивность таких движений, как показал анализ [Викулин, 2008, 2009], пропорциональна угловой скорости вращения планеты вокруг собственной оси, что соответствует известному положению в теории вихрей [Сэффмэн, 2000] о том, что завихренность пропорциональна моменту движения частиц среды, в нашем случае – элементарных объемов – блоков и плит.

Механизм вихревых течений, в рамках задачи Дирихле–Дедекинда–Римана обеспечивающий равновесную эллипсоидальную фигуру вращающейся блоковой среды Пейве–Седова–Садовского (Земли), как видим, является достаточно универсальным. Такой механизм, соединяющий концепцию блоковой геосреды Пейве–Седова–Садовского с решениями задачи Дирихле–Дедекинда–Римана, естественным образом связан с проблемами про-

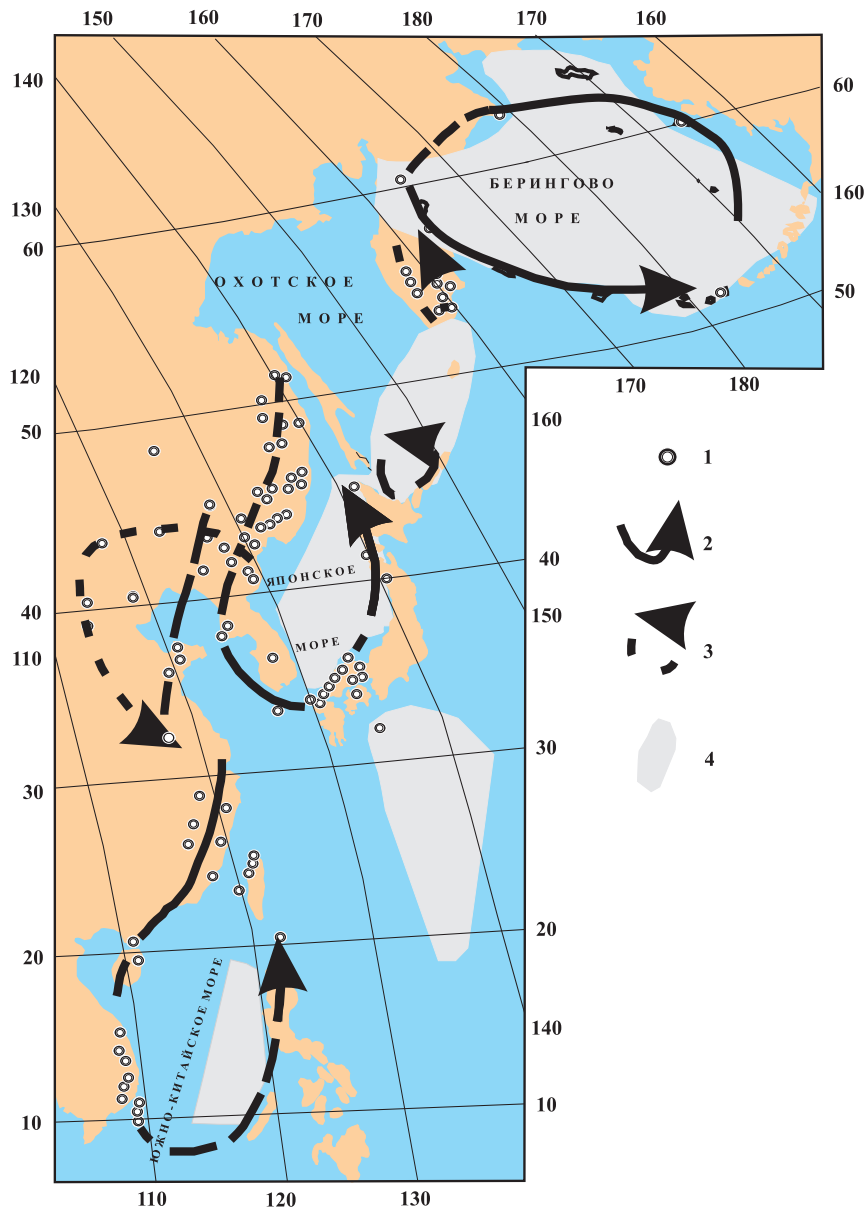


Рис. 8. Позднекайнозойские вулканиды, несущие глубинные включения и контуры вихревых структур на Восточно-Азиатской окраине. 1 – вулканические объекты с глубинными включениями; 2–3 – контуры вихревых структур I (2) и II (3) типов; 4 – поля предполагаемого распространения «аномальной» астеносферы с низкими Sr-изотопными отношениями ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} < 0.7033$) [Колосков, Аносов, 2006].

Fig. 8. The Late Cenozoic volcanites at the East Asian margin. The volcanites have deep inclusions and contours of vortex structures. 1 – volcanic objects with deep inclusions; 2–3 – contours of vortex structures of types I (2) and II (3); 4 – fields of assumed «anomalous» asthenosphere with low Sr-isotope ratios ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} < 0.7033$) [Koloskov, Anosov, 2006].

исхождения всей Солнечной системы в целом. Такой механизм создает условия для реализации движения блоков и плит под действием собственных моментов, формируя, тем самым, дальнедействующее планетарное упругое поле, и посредством упругих циркулярно поляризованных геодинамических волн «накачивает» в геосреду «латентную, сохраняющуюся, как в аккумуляторе, в течение длительного времени» [Пономарев, 2008] энергию. Другими словами, такой моментный вихревой механизм и превращает геосреду в энергонасыщенную и, как следствие, в нелинейную и самоорганизую-

щуюся. Такой достаточно универсальный механизм, позволяющий объяснить и увязать между собой большое количество геофизических и геологических явлений, на наш взгляд, может быть использован в качестве основного «движителя» новой геологической парадигмы, которую можно назвать вихревая (или моментная) геодинамика.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основное отличие вихревой (моментной, волновой) геодинамики от глобальной тектоники заключается

в следующем. Стремление фигуры вращающейся Земли к равновесной эллипсоидальной форме «включает» моментный механизм вращения ее «элементарных» объемов. Тем самым, генерируется планетарное (самоорганизованное) упругое поле, в котором взаимодействие плит и блоков и их перемещение осуществляются посредством ротационных геодинамических волн. Другими словами, вихревая геодинамика – это вращение Земли вокруг своей оси в сочетании с геодинамическими процессами.

ЛИТЕРАТУРА

- Авсюк Ю.Н. Размышления Михаила Александровича о тектонике // Михаил Александрович Садовский. Очерки. Воспоминания. Материалы / Ред. А.В. Николаев. – М.: Наука, 2004. – С. 186–190.
- Айзекс Б., Оливер Дж., Сайкс Л. Сейсмология и новая глобальная тектоника // Новая глобальная тектоника. – М.: Мир, 1974. – С. 133–179.
- Аносов Г.И., Константинова Т.Г., Делемень И.Ф. Некоторые сведения о крутильных деформациях при землетрясениях в связи с развитием методов сейсмического микрорайонирования и усиления зданий // Вихри в геологических процессах / Ред. А.В. Викулин. – Петропавловск-Камчатский: ИВГиГ ДВО РАН, 2004. – С. 246–252.
- Белоусов В.В., Гзовский М.В. Тектонические условия и механизм возникновения землетрясений // Труды Геофизического института АН СССР. – 1954. – № 2 (152). – С. 14–25.
- Быков В.Г. Нелинейные волновые процессы в геологических средах. – Владивосток: Дальнаука, 2000. – 190 с.
- 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 // Доклады 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. Ротационные упругие поля в твердых телах и вихревые решения проблемы Дирихле: тождественные системы? // Вестник КРАУНЦ. Серия «Науки о Земле». – 2005. – № 2 (6). – С. 86–95.
- Викулин А.В. Мир вихрей. – Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2008а. – 230 с.
- Викулин А.В. Энергия и момент силы упругого ротационного поля геофизической среды // Геология и геофизика. – 2008б. – Т. 49, № 6. – С. 559–570.
- Викулин А.В. Физика Земли и геодинамика. Учебное пособие. – Петропавловск-Камчатский: КамГУ, 2009. – 463 с.
- Викулин А.В., Викулина С.А. Афтершоки и эффект Доплера // Материалы ежегодной конференции, посвященной дню вулканолога. 28–31 марта 2007. – Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2007. – С. 300–311.
- Викулин А.В., Водинчар Г.М. Спектр потока сейсмичности // Четвертый Всероссийский симпозиум «Сейсмоакустика переходных зон»: Материалы докладов. – Владивосток: ТОИ ДВО РАН, 2005. – С. 98–102.
- Викулин А.В., Водинчар Г.М., Мелекесцев И.В., Акманова Д.Р., Осипова Н.А. Моделирование геодинамических процессов окраины Тихого океана // Солнечно-земные связи и предвестники землетрясений. Сборник докладов IV международной конференции. 14–17 авг. 2007 г. Паратунка, Камчатской обл. – Петропавловск-Камчатский: ИКИРП ДВО РАН, 2007. – С. 275–280.
- Викулин А.В., Журавлев В.И. Статистический анализ распределения курило-камчатских землетрясений во времени и в пространстве. Препринт. – Петропавловск-Камчатский: ИВ ДВО АН СССР, 1987. – 28 с.
- Викулин А.В., Иванчин А.Г. Модель сейсмического процесса // Вычислительные технологии. – 1997. – Т. 2, № 2. – С. 20–25.
- Викулин А.В., Иванчин А.Г. Ротационная модель сейсмического процесса // Тихоокеанская геология. – 1998. – Т. 17, № 6. – С. 95–103.
- Викулин А.В., Кролевец А.Н. Чандлеровское колебание полюса и сейсмотектонический процесс // Геология и геофизика. – 2001. – Т. 42, № 6. – С. 996–1009.
- Викулин А.В., Тверитинова Т.Ю. Энергия тектонического процесса и вихревые геологические структуры // Доклады АН. – 2007. – Т. 413, № 3. – С. 372–374.
- Викулин А.В., Тверитинова Т.Ю. Моментная волновая природа геологической среды // Вестник МГУ. Серия геологическая. – 2008. – № 6. – С. 10–16.
- Викулин А.В., Чернобай И.П. Механизм очага Урупского (1963 г.) и Большого камчатского (1952 г.) землетрясений // Динамические процессы в дискретных геофизических системах. – Владивосток: ТОИ ДВНЦ АН СССР, 1986а. – С. 58–65.
- Викулин А.В., Чернобай И.П. О некоторых особенностях двух сильнейших курило-камчатских землетрясений // Физические поля и свойства горных пород северо-востока СССР. – Магадан: СВКНИИ ДВНЦ АН СССР, 1986б. – С. 44–59.
- Вихри в геологических процессах / Ред. А.В. Викулин. – Петропавловск-Камчатский: КГПУ, 2004. – 297 с.
- Владимиров Ю.С. Метафизика. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. – 568 с.
- Гелл-Манн М. Вопросы на будущее // Фундаментальная структура материи. – М.: Мир, 1984. – С. 266.
- Геологическая история территории СССР и тектоника плит. – М.: Наука, 1989. – 206 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 тектонофизику. Учебное пособие. – М.: КДУ, 2005. – 496 с.
- Давыдов А.С. Солитоны в квазидомерных молекулярных структурах // Успехи физических 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.
- Егулов К.В. Проблемы проектирования на сейсмостойкость протяженных и несимметричных сооружений // Сейсмостойкое строительство. – 2000. – № 1. – С. 23–30.
- Жарков В.Н. Внутреннее строение Земли и планет. – М.: Наука, 1983. – 416 с.
- Жунусов Т.Ж., Кузьмина Н.В., Токмаков В.А., Харин Д.А. Поворотные колебания высотного здания // Вопросы инженерной сейсмологии. Вып. 21. – М.: Наука, 1980. – С. 112–116.
- Захаров В.С. Поиск детерминизма и наблюдаемых геолого-геофизических данных: анализ корреляций размерности временных рядов // Современные процессы геологии. Сборник научных трудов. – М.: Научный мир, 2002. – С. 184–187.
- Землетрясения: уроки и проблемы // Природа. – 1989. – № 12. – 128 с.
- Зоненшайн Л.П., Савостин Л.А. Введение в геодинамику. – М.: Наука, 1979. – 311 с.
- Ключевский А.В. Напряжения, деформации и сейсмичность на современном этапе эволюции литосферы Байкальской рифтовой зоны. Автореф. дис. ... докт. геол.-мин. наук. – Иркутск: ИЗК СО РАН, 2008. – 31 с.
- Клячко М.А. Землетрясения и мы. – СПб: РИФ «Интеграф», 1999. – 234 с.
- Колосков А.В., Аносов Г.И. Особенности геологического строения и позднекайнозойский вулканизм восточно-азиатской окраины в рамках концепции вихревой динамики // Фундаментальные исследования океанов и морей. Книга 1 / Ред. Н.П. Лавверов. – М.: Наука, 2006. – С. 278–291.
- Кондратьев Б.П. Теория потенциала и фигуры равновесия. – М.–Ижевск: Ин-т компьютерных технологий, 2003. – 624 с.
- Курленя М.В., Оларин В.Н. Проблемы нелинейной геомеханики. Ч. II // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2000. – № 4. – С. 3–26.
- Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Статистическая физика. – М.: Наука, 1964. – 568 с.
- Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Квантовая механика. Нерелятивистская теория. – М.: Наука, 1974. – 752 с.
- Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория упругости. – М.: Наука, 2003. – 246 с.
- Леви К.Г., Задонина Н.В., Бердникова Н.Е., Воронин В.И., Глызин А.В., Язев С.А., Баасанджан Б., Нинжбадгар С., Балжинян Б., Буддо В.Ю. Современная геодинамика и гелиогеодинамика. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2003. – 383 с.
- Левич В.Г., Вдовин Ю.А., Мямлин В.А. Курс теоретической физи-

- ки. Т. II. – М.: Наука, 1971. – 936 с.
- Ли Сыгуан. Вихревые структуры Северо-Западного Китая. – М.–Л.: Госгеолтехиздат, 1958. – 130 с.
- Лифшиц Е.М. Сверхтекучесть (теория) // Гелий / Ред. А.И. Шальников. – М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1949. – С. 385–429.
- Лукьянов А.В. Нелинейные эффекты в моделях тектогенеза // Проблемы геодинамики литосферы. – М.: Наука, 1999. – С. 253–287.
- Любушин А.А. (мл). Иерархическая модель сейсмического процесса // Физика Земли. – 1987. – № 11. – С. 43–52.
- Магницкий В.А. Внутреннее строение и физика Земли. – М.: Недра. 1965. – 204 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, 1986. – 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.
- Мелекесцев И.В. Природная катастрофа 1737–1742 гг. на Камчатке как модель будущих региональных катастроф на островных дугах Северо-Западной Пацифики // Новейший и современный вулканизм на территории России / Ред. Н.П. Лавверов. – М.: Наука, 2005. – С. 553–571.
- Милановский Е.Е. Пульсации Земли // Геотектоника. – 1995. – № 5. – С. 3–24.
- Милановский Е.Е., Викулин А.В. Предисловие // Ротационные процессы в геологии и физике / Ред. Е.Е. Милановский. – М.: ДомКнига, 2007. – С. 9–14.
- Мирлин Е.Г. Проблема вихревых движений в твердых оболочках Земли и их роли в геотектонике // Геотектоника. – 2006. – № 4. – С. 43–60.
- Мирлин Е.Г. Вихревая тектоника // Доклады АН. – 2009. – Т. 42, № 5. – С. 649–652.
- Михаил Александрович Садовский: Очерки. Воспоминания / Ред. А.В. Николаев. – М.: Наука, 2004. – 271 с.
- Мораан В. Океанические поднятия, глубокоководные желоба, большие разломы и блоки земной коры // Новая глобальная тектоника. – М.: Мир, 1974. – С. 68–93.
- Николаев А.В., Рыкунов Л.Н., Хаверошкин О.Б., Циплаков В.В. Высокочастотные сейсмические шумы и вибросигналы: метод, результаты и перспективы. – М.: ИФЗ АН СССР, 1985. – 60 с. (Деп. В ВИНТИ 23.01.85, № 1160-85).
- Николаевский В.Н. Математическое моделирование уединенных деформационных и сейсмических волн // Доклады АН. – 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.
- Осипова Н.А. О миграции тихоокеанских землетрясений в области магнитуд $M > 8$ // Геофизический мониторинг и проблемы сейсмической безопасности Дальнего Востока России: Труды региональной научно-технической конференции, 11–17 ноября 2007. – Петропавловск-Камчатский: КФ ГС РАН, 2008. Т. 2. – С. 196–199.
- Пейве А.В. Тектоника и магматизм // Изв. АН СССР. Серия геологическая. – 1961. – № 3. – С. 36–54.
- Пономарев В.С. Энергонасыщенность геологической среды. Труды ГИНа РАН. Вып. 582. – М.: Наука, 2008. – 379 с.
- Поталов А.И. Волны деформации в среде с внутренней структурой // Нелинейные волны. – Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2005. – С. 125–140.
- Проблемы геофизики XXI века. В двух кн. / Ред. А.В. Николаев. – М.: Наука, 2003. – 311 с., 333 с.
- Прозоров А.Г. О пониженной вероятности сильных толчков в некоторой пространственно-временной окрестности сильных землетрясений мира // Вычислительная сейсмология. Вып. 11. – М.: Наука, 1978. – С. 35–47.
- Прозоров А.Г. Об автоматичности распределения афтершоков по магнитуде // Доклады АН СССР. – 1984. – Т. 277, № 3. – С. 573–577.
- Пуцаровский Ю.М. Глобальная тектоника в перспективе // Тектоника земной коры и мантии. Тектонические закономерности размещения полезных ископаемых: Материалы XXXVIII Тектонического совещания. – М.: ГЕОС, 2005. Т. 2. – С. 121–123.
- Ризниченко Ю.В. Проблемы сейсмологии. Избранные труды. – М.: Наука, 1985. – 408 с.
- 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.: ДомКнига, 2007. – 528 с.
- Садовский М.А. О моделях геофизической среды и сейсмического процесса // Горный журнал. – 1984. – № 7. – С. 268–272.
- Садовский М.А. Новая модель геофизической среды // Българско геофизично списание. – 1985. – Т. XII, № 2. – С. 3–10.
- Садовский М.А. Избранные труды. Геофизика и физика взрыва. – М.: Наука, 2004. – 440 с.
- Садовский М.А., Болховитинов Л.Г., Писаренко В.Ф. Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс. – М.: Наука, 1987. – 101 с.
- Садовский М.А., Писаренко В.Ф. Сейсмический процесс в блоковой среде. – М.: Наука, 1991. – 96 с.
- Садовский М.А., Писаренко В.Ф., Родионов В.Н. От сейсмологии к геомеханике. О модели геофизической среды // Вестник АН СССР. – 1983. – № 1. – С. 82–88.
- 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.
- Семицкий К.Ж. Внутренняя структура континентальных разломов. Тектонофизический аспект. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2003. – 244 с.
- Синергетика геосистем: Материалы симпозиума «Синергетика геосистем», 16–19 апреля 2007 г. – М.: ИГЕМ РАН, 2007. – 213 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.
- Стовас М.В. Избранные труды. – М.: Недра, 1975. Ч. 1. – 155 с.
- Сэффмэн Ф.Дж. Динамика вихрей. – М.: Научный мир, 2000. – 376 с.
- Тверитинов Ю.Т., Тверитинова Т.Ю. Закономерность смены структурных планов в складчатых областях // Вестник КРАУНЦ. Серия «Науки о Земле». – 2006. – № 1(7). – С. 67–94.
- Тверитинова Т.Ю., Викулин А.В. Геологические и геофизические признаки вихревых структур в геологической среде // Вестник КРАУНЦ. Серия «Науки о Земле». – 2005. – № 5. – С. 59–77.
- Тверитинова Т.Ю., Викулин А.В. Волновая ротационно-упругая тектоника планет // Ротационные процессы в геологии и физике / Ред. Е.Е. Милановский. – М.: ДомКнига, 2007. – С. 271–278.
- Тектоника и геофизика литосферы: Материалы XXXV Тектонического совещания. Т. 1, 2. – М.: ГЕОС, 2002. – 368 с., 378 с.
- Тимашев С.Ф. О базовых принципах «Нового диалога с Природой» // Проблемы геофизики XXI века. Кн. 1 / Ред. А.В. Николаев. – М.: Наука, 2003. – С. 104–141.
- Федотов С.А. Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги. – М.: Наука, 2005. – 302 с.
- Ферми Э. Квантовая механика. – М.: Мир, 1968. – 368 с.
- Ферронский В.И., Ферронский С.В. Динамика Земли. Теория движения планеты на основе динамического равновесия. – М.: Научный мир, 2007. – 336 с.
- Хаин В.Е., Ломизе М.Г. Геодинамика с основами геотектоники. – М.: КДУ, 2005. – 560 с.
- Хаин В.Е., Полетаев А.И. Ротационная тектоника Земли // Наука в России. – 2007. – № 6. – С. 14–21.
- Халчанский С.А. Проблема регистрации угловых перемещений в сейсмологии // Сейсмические приборы. Вып. 30. – М.: ОИФЗ РАН, 1998. – С. 80–82.
- Харленд У.Б., Кокс А.В., Плевеллин 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.
- Шебалин Н.В. Количественная макросейсмика (фрагменты незавершенной монографии). Проблемы макросейсмики // Вычислительная сейсмология. – 2003. – Вып. 34. – С. 57–200.
- 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.
- Шерман С.И., Семинский К.Ж., Борняков С.А., Адамович А.Н., Буддо В.Ю.* Разломообразование в литосфере. Зоны сжатия / Ред. Н.А. Логачев. – Новосибирск: Наука, 1994. – 263 с.
- Шерман С.И., Семинский К.Ж., Борняков С.А., Адамович А.Н., Лобацкая Р.М., Лысак С.В., Леви К.Г.* Разломообразование в литосфере. Зоны растяжения / Ред. Н.А. Логачев. – Новосибирск: Наука, 1992. – 228 с.
- Brace W.F., Bombolakis E.G.* A note on brittle crack growth in compression // Journal of Geophysical Research. – 1963. – V. 68, № 12. – P. 3709–3713.
- Daly M.C.* Correlation between Nazka-Farallon plate kinematics and forearc basin evolution in Ecuador // Tectonics. – 1989. – V. 8, № 4. – P. 769–790.
- Duda S.J.* Strain release in the Circum-Pacific belt, Chile 1960 // Journal of Geophysical Research. – 1963. – V. 68. – P. 5531–5544.
- 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, echeleon faults and allied phenomena // Gerlands beiträge zur geophysik, zweite supplementband, 1933. – P. 303–360.
- Geist E.L., Childs J.R., Scholl D.W.* The origin of basins of the Aleutian ridge: implications for block rotation of an arc massif // Tectonics. – 1988. – V. 7, № 2. – P. 327–341.
- Hashimoto M., Tada T.* Horizontal crustal movements in Hokkaido and its tectonic implications // Journal of the Seismological Society of Japan (Zisin). – 1988. – V. 41, № 1. – P. 29–38.
- Huang B.S.* Evidence for azimuthal and temporal variations of the rupture propagation of the 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake from seismic data recorded by a dense array // Geophysical Research Letters. – 2001. – V. 28. – P. 3370–3380.
- Lee J.S.* Some characteristic structural types in Eastern Asia and their bearing upon the problems of continental movements // Geology Magazine. – 1928. – V. LXVI. – P. 422–430.
- Lomnitz C.* Some observations of gravity waves in the 1960 Chile earthquake // Bulletin of the Seismological Society of America. – 1970. – V. 59. – P. 669–670.
- Lomnitz C.* Mexico 1985: the case for gravity waves // Geophysical Journal International. – 1990. – V. 102, № 3. – P. 569–572.
- Lomnitz C., Castanos H.* Earthquake hazard in the Valley of Mexico: entropy, structure, complexity // Earthquake source asymmetry, structural media and rotation effects / Eds. R. Teisseyre, M. Takeo, E. Majewski. – Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2006. – P. 347–364.
- Nur A., Ron H., Scotti O.* Fault mechanics and the kinematics of block rotation // Geology. – 1986. – V. 14. – P. 746–749.
- Takeo M.* Ground rotational motions recorded in near-source region of earthquakes // Geophysical Research Letters. – 1998. – V. 25. – P. 789–792.
- Vikulin A.V.* Earth rotation, elasticity and geodynamics: earthquake wave rotary model // Earthquake source asymmetry, structural media and rotation effects / Eds. R. Teisseyre, M. Takeo, E. Majewski. – Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2006. – P. 273–289.
- Vikulin A.V., Krolevets A.N.* Seismotectonic processes and the Chandler oscillation // Acta Geophysica Polonica. – 2002. – V. 50, № 3. – P. 395–411.
- Xie Xin-sheng.* Discussion on rotational tectonics stress field and the genesis of circum-Ordos langmass fault system // Acta Seismologica Sinica. – 2004. – V.17, № 4. – P. 464–472.
- Yoffe E.H.* The moving Griffith crack // Philosophy Magazine. – 1951. – V. 42, № 330. – P. 46–52.



Викulin Александр Васильевич, докт. физ.-мат. наук, в.н.с.
Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН
683006, Петропавловск-Камчатский, бульвар Пийпа, 9, Россия
Тел. 8(41522)58572, 8(914)7815509; e-mail: vik@ksnet.ru



Vikulin, Alexander V., Doctor of Physics and Mathematics, Leading Researcher
Institute of Volcanology and Seismology, Far East Branch of RAS
683006, Petropavlovsk-Kamchatsky, Piip blvd, 9, Russia
Tel. +7 (41522)58572, +7 (914)7815509; e-mail: vik@ksnet.ru