

ВОЛНОВЫЕ ДВИЖЕНИЯ БЛОКОВОЙ ГЕОСРЕДЫ

Викулин А.В.

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский, vik@kscnet.ru

Введение [5]. Р. Фейман отмечал: «Относительности вращения не существует. Вращающаяся система – не инерциальная система, и законы физики в ней другие». В последние десятилетия в науках о Земле обоснована гипотеза *блокового строения* геологической и геофизической сред – *геосреды* и каноничности ее дискретных свойств. Такие представления, как показывают работы многих исследователей, используются без того индивидуального для каждого блока и их совокупностей смысла, который в случае *вращения* геосреды определяется законами классической механики. На примере упругой оболочки вращающейся Земли – ее «твердой» земной коры, проблема о ее напряженном состоянии формулируется как ротационная задача с собственными степенями свободы слагающих ее «элементарных» объемов – геоблоков. В рамках такой задачи получаются волновые решения земной коры с симметричным тензором напряжений и, как следствие, дается объяснение некоторым ее свойствам, имеющим физические аналоги в физике твердого тела, физической (нелинейной) акустике и метериаловедении.

Напряжения с моментом силы: энергонасыщенность, сейсмическая эмиссия. Как известно, угловая скорость Ω , с которой вращается в данный момент времени жестко связанная с телом (Землей) система координат, не зависит от этой системы и каждый элемент земной коры (блок) независимо от его размера можно характеризовать *одинаковым моментом импульса М*, направленным параллельно оси вращения Земли. Движение земной коры вдоль поверхности Земли изменяет направление момента \mathbf{M} , что в соответствии с законом его сохранения приводит к появлению момента силы \mathbf{K} , прикладываемому к блоку со стороны *окружающей* его среды — земной коры. Таким образом, приходим к модели, в которой описание движения блока геосреды механически эквивалентно его движению в инерциальной (не вращающейся) системе координат под действием *собственного момента импульса М* [5]. Вращение геоблоков подтверждено инструментальными геодезическими GPS наблюдениями [14].

“Внутренний” или собственный момент \mathbf{M} обладает специфическим для геодинамики свойством — он не может в силу закона сохранения исчезнуть, в том числе за счет пластической деформации – для этого надо будет и Землю и кору одновременно двигать в обратных направлениях. Поэтому соответствующие моменту \mathbf{M} напряжения с *моментом силы К* в окружающей блок земной коре будут *накапливаться*, чем и можно объяснить такое известное свойство геосреды, как ее энергонасыщенность [19]. По-видимому, с этим же свойством геосреды может быть связано и явление сейсмической эмиссии [23].

Ротационное упругое поле: симметричный тензор напряжений. Решалась задача определения поля упругих напряжений σ , его энергии W_0 и момента силы K_0 , создаваемого вокруг блока шаровой формы R_0 , движущегося в инерциальной (не вращающейся) системе координат под действием собственного момента. Аналитическое решение задачи в области $r > R_0$ в сферической системе координат (r, θ, φ) с началом $r = 0$ в центре блока и с плоскостью $\theta = 0$, ортогональной собственному моменту, имеет вид [1; 5]:

$$\sigma_{r\varphi} = \sigma_{\varphi r} = 4\Omega R_0^4 r^{-3} \sqrt{\frac{\rho G}{5\pi}} \sin\theta \sin\beta/2, \quad r \geq R_0, \quad (1)$$

$$W_0 = \frac{16}{15} \pi \rho \Omega^2 R_0^5 \sin^2 \beta/2, \quad K_0 = -8\pi^{3/2} \Omega R_0^4 \sqrt{\frac{\rho G}{5}} \sin\beta/2, \quad (2.1; 2.2)$$

Остальные компоненты тензора напряжений равны нулю. Здесь ρ и G — плотность и модуль сдвига геосреды, Ω — угловая скорость вращения Земли вокруг своей оси.

Взаимодействие блоков: дальное действие и близкое действие. В модели двух блоков R_{01} и R_{02} , расположенных на расстоянии l друг от друга, рассчитаны энергия их взаимодействия W_{int} и соответствующий ей момент силы K_{int} [1]:

$$W_{int} = \frac{3}{2} \pi \rho \Omega^2 R_{01}^4 R_{02}^4 l^{-3} \cos \phi, K_{int} = -\frac{3}{2} \pi \rho \Omega^2 R_{01}^4 R_{02}^4 l^{-3} \sin \phi. \quad (3.1; 3.2)$$

Здесь угол ϕ - угол между собственными моментами сил блоков. Момент силы (3.2) приложен со стороны упругого поля к поверхности каждого из блоков и направлен таким образом, чтобы уменьшить энергию их взаимодействия (3.1). Этот момент для обоих блоков имеет одно и то же абсолютное значение, но для разных блоков он направлен в противоположные стороны.

Для равновеликих блоков $R_{01} = R_{02}$ рассчитывались отношения K_{int} (3.2) к собственному моменту K_0 (2.2) и W_{int} (3.1) к собственной энергии W_0 (2.1). Максимальные «моментное» l_{0K} и «энергетическое» l_{0W} расстояния, на которых $K_{int} = K_0$ и $W_{int} = W_0$, оказались равными [5]:

$$l_{0K} \approx R_0, l_{0W} \approx 10^2 R_0. \quad (4.1; 4.2)$$

Как видим, *моментное взаимодействие* между геоблоками, характеризуемое (4.1), распространяется на небольшие расстояния, не превышающие размеров блоков, и, как и молекулярные взаимодействия между частицами среды в классической теории упругости, может являться *близкодействующим*. *Энергетическое же взаимодействие* распространяется на большие расстояния и может являться *дальнодействующим*. Таким образом, геодинамическое взаимодействие блоков в рамках ротационной модели может являться физическим аналогом общего принципа — корпускулярно-волнового дуализма: в движении геофизических блоков, тектонических плит и других геологических структур проявляются как корпускулярные, так и волновые черты. Покажем это для цепочки взаимодействующих блоков геосреды, моделирующих сейсмический пояс на примере окраины Тихого океана.

Цепочка блоков: новый тип ротационных волн. Получены законы движения цепочки блоков, генерирующих собственные упругие поля (1; 2) и взаимодействующих между собой (3), в виде нелинейных уравнений, допускающих два типа решений, в терминологии А.С. Давыдова – солитоны (V_c) и экситоны (V_{ex}) с характерными скоростями c_0 и V_S [5]:

$$0 \leq V_c \leq c_0, c_0 = k^{-1} \sqrt{V_R V_S}, c_0 = 1-10 \text{ см/с}; c_0 < V_{ex} \leq V_S, V_S \approx 4 \text{ км/с}. \quad (5.1; 5.2; 5.3; 5.4; 5.5)$$

Здесь $k \approx 10^4 (10^3-10^5)$ – коэффициент нелинейности геосреды, $V_R = \Omega R_0$, V_S – скорость поперечных волн в земной коре.

Волновые решения в виде «медленных» солитонов V_c и «быстрых» экситонов V_{ex} достаточно хорошо объясняют весь спектр скоростей миграции тихоокеанских землетрясений [1]. Такие же по сути деформационные и маятниковые волны инструментально зарегистрированы в шахтах и смоделированы в лабораторных условиях [5]. Эти данные показывают, что характерными для блоковой вращающейся среды (геосреды) помимо продольных и поперечных сейсмических волн являются и ротационные «медленные» (солитоны) и «быстрые» (экситоны) волны. Вывод о существовании нового типа волн подтверждается и теоретическими и экспериментальными данными, полученными в физике твердого тела [11], физической акустике [22] и материаловедении [10].

Рейдные свойства геосреды как аналог сверхтекучести квантовой жидкости. Имеется много свидетельств визуально наблюдаемого движения земной поверхности в направлении от очагов землетрясений в виде «горбов Земли». Анализ всех таких геолого–геофизических движений позволил сформулировать неожиданный вывод. А именно: такие движения грунта, которые часто сопровождаются большими деформациями до 0,5 и более и не оставляющие после себя никаких следов на поверхности, характерны для *жидкого состояния* вещества [15]. Именно такое геолого–геофизическое состояние, не имеющее аналогов в реологии, и позволило *геологам* в 1930–х гг. ввести в рассмотрение рейдные или сверхпластичные деформации Земли «как течение материала в твердом состоянии» [9]. Покажем, что такое *геодинамическое* состояние геосреды может являться следствием ее ротационного движения и блокового строения.

Температура Дебая θ_d для геосреды может быть записана в виде [9]: $\theta_d \approx 10^{-3} \bar{V}(H) \sqrt[3]{\rho(H)}$, где \bar{V} и ρ – средняя скорость возбуждений в геосреде, см/с, и ее плотность, г/см³, H – глубина. При средней скорости (определяемой продольной V_P и поперечной V_S сейсмическими скоростями) для литосферы и верхней мантии, изменяющейся в пределах 1–10 км/с, температура Дебая достаточно высока; для глубины $H = 100$ км она составляет $\theta_d \approx 660^\circ \text{C} \approx 1000^\circ \text{K}$ и хорошо соответствует общепринятой модели физики Земли [9].

«Ситуация кардинальным образом меняется при переходе к ротационной моде c_0 (5.1–5.3) – «глобальным» геодинамическим движениям с предельной скоростью 1–10 см/с, определяемой *коллективными движениями* совокупностей геофизических блоков, тектонических плит и геологических структур. Характерная для таких движений температура Дебая составляет ничтожно малую величину: $\theta_d \approx 10^{-2} K$, которая и может определять возможность реидного движения геосреды и/или ее «сверхпластичное течение в твердом состоянии». Физическим аналогом реидного течения геосреды, отвечающего коллективному движению слагающих ее блоков, на наш взгляд, может являться сверхтекучее течение квантовой жидкости, соответствующее «состояниям всей жидкости в целом» [16]. Возможность существования реидных свойств позволяет вихревые движения геосреды описывать решениями Дирихле–Дедекинда–Римана для задачи о вращающейся гравитирующей невязкой жидкости [1].

Миграции вулканической активности и вулканический инвариант. Показано, что извержениям вулканов вдоль трех самых активных поясов планеты свойственна миграция. Оказалось, что скорости миграции вулканической активности по порядку величины совпадают со скоростями миграции сейсмичности [25]. Этот результат позволяет и к изучению закономерностей вулканического процесса подходить с позиции блоковой с волновыми свойствами геосреды [1; 23].

Отражением «блокового характера» вулканического процесса, «квантовой» характеристикой отдельно взятого извержения вулкана может являться питающий извержение магматический очаг – аналог очага землетрясения в сейсмическом процессе. О размерах магматических очагов в случае достаточно интенсивных извержений вулканов можно судить по образовавшимся кальдерам с диаметрами до $D = 10–15$ км и более и выброшенным материалом до 100 км^3 и более. Анализировались закономерности самых общих распределений [4]: графиков повторяемости извержений вулканов и распределений чисел их извержений, как по размерам образовавшихся кальдер, так и по объемам выброшенного при извержениях материала. Показано существование вулканического инварианта – постоянной, не зависящей от вулканического процесса: толщина магматического очага является величиной постоянной, около $h = 0,5$ км, не зависящей ни от места расположения вулкана, ни от времени его извержения, ни от типа извержения. Такой магматический очаг имеет «блинообразную» форму: $D \gg h$. Сформулирована гипотеза: инвариант, отвечающий за «блинообразную» форму магматического очага, определяется состоянием самой геосреды, ее блоковым строением [4].

Новая модель «блинообразного» магматического очага извержения вулкана. Разработана принципиально новая модель «блинообразного» корового (на глубине 5–7 км) магматического очага, питающего извержение вулкана. В основу модели заложены представления разработанной в материаловедении концепции «теплового самоускорения» для твердых тел с интенсивными деформациями при условии малой теплопроводности тел. Проведен термодинамический расчет состояния вещества геосреды, находящегося при таких условиях. Показано, что при локальных плавлениях и увеличении объема очага вокруг него создается дополнительное давление и появляется поле упругих напряжений, энергия которого порядка 10^{15} Дж/км^3 перегретой породы. Перегретые магматические очаги достаточно сильных извержений (с объемами $V > 0,1 \text{ км}^3$) по величине накопленной вокруг них упругой энергии оказываются близкими очагам наиболее крупных (протяженностью 100–200 км и более) землетрясений с магнитудами около $M = 8$ и более [6].

Блоковая геосреда и волновая геодинамика. «Энергетическая» близость магматических и сейсмических рядом расположенных дуг (цепочек соответствующих очагов) в рамках разрабатываемой авторами модели блоковой геосреды позволяет объяснить и взаимодействие вулканов (их магматических очагов) между собой (миграцию вулканической активности) и взаимодействие вулканизма, сейсмичности и тектоники [7]. Таким образом, вывод о «блинообразном» магматическом очаге, являющийся следствием блокового строения земной коры, является фундаментальным не только для вулканологии, но и для геодинамики, в целом. Действительно, в таком случае в рамках ротационной концепции оказывается возможным «состыковать» вулканический процесс с представлениями о волновом геодинамическом процессе, протекающем в блоковой геосреде.

Обсуждение результатов. *О природе границы Мохо.* Представления о тонких прослоях в виде магматических очагов, параметры которых определяются блоковыми свойствами земной коры, можно распространить на всю земную кору, включая и границу Мохо. Имеет ли верхняя мантия, расположенная ниже подошвы земной коры, блоковое строение, не известно. Вполне определенно

можно судить лишь о блоковом строении земной коры. При p - T условиях, которые реализуются на границе Мохо, можно ожидать, что ниже этой границы геосреда может не являться блоковой. Вероятнее всего, вещество ниже Мохо в значительной степени должно обладать свойством объемного [18], а не сдвигового движения. В свете развиваемой авторами ротационной механики [1; 5; 7] и модели «теплового самоускорения» [6] можно предположить: подошва земной коры может представлять собой поверхность, ниже которой литосфера и верхняя мантия не являются блоковыми. Тогда геодинамическое состояние вещества на границе Мохо может определяться фазовым переходом от блоковой земной коры к неблоковой литосфере и верхней мантии [7]. Предлагаемый нами «фазовый» подход к описанию свойств границы Мохо является близким модели Н.И. Павленковой.

Ротационный смысл сейсмического момента. Глобальное ротационное упругое поле Земли, как показано в работе, складывается из своеобразных «квантов» – локальных полей, генерируемых как каждым поступательно движущимся вдоль поверхности вращающейся Земли блоком (плитой, геологической структурой) в отдельности (1; 2), так и взаимодействиями этих геодинамических отдельных между собой (3). Момент силы (2,2; 3,2), по сути – *сейсмический момент*, является таким же «неотъемлемым» характерным параметром каждого ротационного локального и всего глобального полей, как, например, спин фотона – кванта электромагнитного поля и/или электрона – элементарной частицы. В рамках разрабатываемой нами ротационной концепции «генетическая» взаимосвязь понятий «поле упругих напряжений» и «момент силы» обеспечивается выполнением закона сохранения момента импульса, что на макроскопическом планетарном уровне и может являться объяснением природы дуализма геодинамического поля.

Ротационная модель геосреды и математические модели Коссера и ей подобные. «Теории среды Коссера и других тел с микроструктурой по своим гипотезам занимают промежуточное положение между классической теорией упругости и физикой твердого тела, стоящей на позиции существования структурных уровней. Материальная точка в среде с микроструктурой имеет «разумную» степень сложности, что позволяет описывать и структуру материала (это недоступно для теории упругости), и волны деформации (это недоступно для материаловедения) ... Тяжела «шапка Мономаха», выбирающих этот путь, поскольку они соприкасаются со сферами материаловедения и теории упругости и открыты критике обеих сторон» [8].

В рамках ротационной блоковой модели на примере упругой оболочки вращающейся Земли – ее «твердой» земной коры, проблема о ее напряженном состоянии формулируется как такая ротационная задача с *собственными* степенями свободы слагающих ее «элементарных» объемов, в рамках которой оказывается возможным получить волновые решения с симметричным тензором напряжений (1). Для такой среды «шапку Мономаха» [8] оказывается возможным «удержать» и отказаться от использования математической, по сути, с проблемами физического плана [24] моментной теории упругости [8]. Для этого, полагаем, необходимо будет отказаться от традиционного для теории упругости принципа напряжений Коши [17] и заменить концепцию «точка твердого тела» [20] на «элементарный объем твердого тела с собственным моментом». Отличие предлагаемого нами подхода от «традиционного» [7; 25] заключается в следующем. «Элементарный объем» *вращающегося* твердого тела – блок земной коры – должен полагаться, во-первых, *жестким, не деформируемым* объемом. Во-вторых, его движение должно происходить под действием *собственного* момента и, в-третьих, такое движение может приводить к изменению напряженного состояния в *окружающей* блок земной коре.

Нелинейная геодинамика как раздел геологии развивается в работах Ю.М. Пушаровского, Н.В. Короновского и др. геологов. При этом авторы оперируют терминами «детерминированная хаотичность», «бифуркации геологических процессов», «глобальная геодинамическая нелинейность» и др. [21, с. 102–120], «фрактальность», «критическая нарушенность», «поле надежной прогнозируемости» и др. [13], которые, фактически, никак не определяют. Парадокс такого *геологического*, по сути, *описательного* подхода к проблеме заключается в следующем. В физике, откуда в науку и пришло понятие нелинейности, каждая из нелинейностей (геометрическая, физическая, структурная и др.) достаточно строго объясняется и *количественно* определяется соответствующими членами уравнений, описывающими движение среды. Убери уравнения – и физика и количественная характеристика нелинейностей исчезают, а само понятие становится, по сути, философской категорией. Рассуждать геологам о нелинейности, как физической категории, бессмысленно, они никогда не смогут определить ее количественно. Более того, например, в учебнике [12, с. 493–513], в котором формулируется «концепция нелинейности в геологии», полностью отсутствует литература, из которой студенты смогли бы узнать истоки проблемы и, по сути, ее физическую сущность. Другое дело, говорить не о нелинейности геосреды, а о таких ее

понятных геологам свойствах, как реидность [18], энергонасыщенность [19] и способность создавать вихревые структуры, которые, скорее всего, связаны с нелинейными свойствами геосреды [2] и особенностями взаимодействия геодинамических волн с гравитацией [3; 26]. Центр тяжести исследования этого направления в геологии представляется целесообразным перенести с «философской» составляющей на изучение *геодинамических* (и геологических и геофизических, которые, вообще говоря, различаются) *свойств геосреды*. Это оказывается возможным осуществить, например, в рамках развиваемой автором ротационной геомеханики [1–7; 26] и наличию взаимосвязи между нелинейностью геосреды и ее волновыми свойствами (5.1–5.3).

Список литературы

1. Викулин А.В. Сейсмичность. Вулканизм. Геодинамика. Избранные труды. Петропавловск–Камчатский: КГУ, 2011. 407 с.
2. Викулин А.В. Нелинейность–фрактальность или реидность–энергонасыщенность: какие категории ближе геологии? (Отзыв на статью Н.В. Короновского, А.А. Наймарка «Методы динамической геологии на критическом рубеже применимости») // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2013. № 1. Выпуск 21. С. 163–168.
3. Викулин А.В. О геодинамическом детекторе гравитационных волн // Пространство и время. 2014. № 1 (15). С. 196–207.
4. Викулин А.В., Акманова Д.Р. Магматический очаг как свойство земной коры // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2014. № 1. Выпуск 23. С. 213–230.
5. Викулин А.В., Иванчин А.Г. О современной концепции блочно–иерархического строения геосреды и некоторых ее следствиях в области наук о Земле // Физико–технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2013. № 3. С. 67–84.
6. Викулин А.В., Иванчин А.Г. Новый взгляд на природу магматического очага // Система «Планета Земля»: 200 лет Священному союзу (1815 – 2015). М.: ЛЕНАРД, 2015. С. 293–321.
7. Викулин А.В., Иванчин А.Г. Вулканический процесс в блоковой геосреде // Литосфера. 2015. № 4. С. 5–13.
8. Ерофеев В.И. Волновые процессы в твердых телах. М.: МГУ, 1999. 328 с.
9. Жарков В.Н. Внутреннее строение Земли и планет. М. Наука, 1983. 416 с.
10. Зуев Л.Б., Данилов В.И., Баранникова С.А. Физика макролокализации пластического течения. Новосибирск: Наука, (2008). 328 с.
11. Ильгамов М.А. Скорость волн и спектр частот продольных колебаний нанопленок из интерметаллов // Физика твердого тела. 2015. Т. 57. Вып. 5. С. 950–954.
12. Короновский Н.В. Общая геология : учебник. М.: КДУ, 2006. 528 с.
13. Короновский Н.В., Наймарк А.А. Методы динамической геологии на критическом рубеже применимости // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2013. № 1. Выпуск 21. С. 152–162.
14. Кузиков С.И., Михамедиев Ш.А. Структура поля современных скоростей коры в районе Центрально–Азиатской GPS сети // Физика Земли. 2010. № 7. С. 33–51.
15. Кузнецов В.В. Ударно – волновая модель землетрясения. 1. Сильные движения землетрясения как выход ударной волны на поверхность // Физическая мезомеханика. 2009. Т. 12. № 6. С. 87–96.
16. Ландау Л.Д. Теория сверхтекучести гелия II. Собрание трудов. Т. 1. М.: Наука, 1969. 352–385 с.
17. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория упругости. М.: Наука, 2003. 264 с.
18. Леонов М.Г. Тектоника консолидированной коры. М.: Наука, 2008. 457 с.
19. Пономарев В.С. Энергонасыщенность геологической среды. М.: Наука, 2008. 379 с.
20. Потапов А.И. Волны деформации в среде с внутренней структурой // Нелинейные волны' 2004 / Ред. А.В. Гапонов–Грехов, В.И. Некоркин. Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2005. 544 с.
21. Пущаровский Ю.М. Избранные труды : Тектоника Земли: в 2 т. Т. 1. М.: Наука, 2005. 350 с.
22. Руденко О.В., и др. Нелинейная модель гранулированной среды, содержащей слои вязкой жидкости и газовые полости // Акустический журнал. 2012. Т. 58. № 1. С. 112–120.
23. Рыкунов Л.Н., Хаврошкин О.Б., Цыплаков В.В. Временные вариации высокочастотных сейсмических шумов // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1979. № 11. С. 72–77.
24. Хирт Дж., Лотэ И. Теория дислокаций. М.: Атомиздат, 1972. 867 с.
25. Vikulin A.V., Akmanova D.P., Vikulina S.A., et al. Migration of seismic and volcanic activity as display of wave geodynamic process // Geodynamics & Tectonophysics. 2012. 3 (1). P. 1–18.
26. Vikulin A.V., Dolgaya A.A. Geodynamic waves and gravity // // Geodynamics & Tectonophysics. 2014. 5 (1). P. 291–303.