

**ПРОБЛЕМА РОТАЦИОННЫХ ДВИЖЕНИЙ В ГЕОЛОГИИ
(Отзыв на статью Д.С. Мягкова, Ю.Л. Ребецкого «Эволюция структуры течения рельефа коры эпиплатформенных орогенов под воздействием мелкомасштабной астеносферной конвекции»)**

В качестве рецензента я ознакомился со статьей Д.С. Мягкова и Ю.Л. Ребецкого «Эволюция структуры течения рельефа коры эпиплатформенных орогенов под воздействием мелкомасштабной астеносферной конвекции». Тема, затронутая в рецензируемой статье, актуальна и находится на стыке геодинамики, тектонофизики, математики, физики и механики, и является достаточно сложной с точки зрения понимания сути современных представлений геологии. Авторы статьи геологическую задачу об эволюции эпиплатформенных орогенов и формулируют, и решают в рамках геодинамических и тектонофизических представлений, характерных для тектоники плит (Лобковский и др., 2004).

Статья содержит ряд геодинамических и тектонических положений, физическая трактовка которых может быть не однозначной. Именно на таких моментах мы и остановимся в отзыве.

**О СОВРЕМЕННЫХ ПРЕДСТАВЛЕНИЯХ
ГЕОДИНАМИКИ И ТЕКТОНОФИЗИКИ**

В начале статьи, в ее ввводной части, авторы отмечают, что механизм рассматриваемой ими мелкомасштабной («линейный размер конвективной ячейки — 100–200 км по латерали») термогравитационной конвекции в астеносфере «является, в общем-то, механизмом тектоники плит», то есть — «аналогом крупномасштабной мантийной конвекции». При этом авторы полагают, что такая же, но уже мелкомасштабная конвекция «может считаться ответственной за рельеф земной поверхности и тектонофизическое состояние коры» и «является единственным из потенциально ответственных за эпиплатформенный орогенез региональным процессом, формирующимся за счет внешних по отношению к литосфере источников энергии».

Основные понятия таких наук, как математика, физика и механика, в основном, достаточно определены и «проверены временем». Геодинамика и тектонофизика — науки достаточно молодые. Закладываемые разными авторами в их основы понятия и представления в настоящее время находятся в стадии обсуждения и формирования.

Оконцепции «силы». Согласно работе (Гончаров и др., 2005, с. 13) стержневой идеей тектонофизики «является представление о взаимосвязи трех основных категорий: 1) геологической среды (объект); 2) *тектонических сил* и напряжений (воздействие на объект); 3) тектонических движений и деформаций (следствие воздействия на объект)» (выделено АВ). Именно концепция силы для подавляющего большинства исследователей является в настоящее время основополагающей при решении задач геодинамики и тектонофизики. Действительно, в соответствии с работой (Теркот, Шуберт, 1985, с. 15): «Вегенер предполагал, что раскол Пангеи и последующий дрейф образовавшихся континентов произошли под действием приливных сил или сил, связанных с вращением Земли». Согласно работе (Артюшков, 1979, с. 8): «основным вопросом в науках о твердой Земле является сейчас вопрос о силах, приводящих в движение кору и мантию». Именно «силы обеспечивают дрейф литосферных плит и создают большие напряжения» (Артюшков, 1993, с. 3). В соответствии с работой (Лобковский и др., 2004, с. 303) «в качестве силы, движущей плиты, была предложена конвекция» и далее (Лобковский и др., 2004, с. 321): «нисходящие мантийные течения ... образуют глобальную силу тектоники плит». При этом «большая роль отводится силам — отталкиванию литосферных плит от осей срединных хребтов» (Хаин, Ломизе, 2005, с. 48).

При объяснении особенностей движения вращающейся геосреды применение концепции силы было, фактически, предопределено использованием теоремы Эйлера–Даламбера — одной из основных гипотез тектоники плит. Действительно, в рамках тектоники плит принято считать, что любые вращательные движения плит в соответствии с этой теоремой механически равнозначны соответствующим им трансляционным перемещениям. Отсюда и «глобальная сила тектоники плит» (Лобковский и др., 2004, с. 321), которая «воздействуя на объект» (Гончаров и др. 2005, с. 13) — литосферные плиты, конвекционными течениями в мантии (Лобковский и др., 2004; Теркот, Шуберт, 1985) «создает большие напряжения» в литосфере (Артюшков, 1993, с. 3). В случае рецензируемой

статьи, по аналогии с тектоникой плит — деформация коры эпиплатформенных орогенов есть результат термогравитационной конвекции в пределах соответствующих протяженностями 100–200 км (мелкомасштабных) конвективных ячеек в астеносфере.

Проведенный в работах (Викулин, 2014, 2016) анализ показал, что применение к геодинамическим задачам теоремы Эйлера–Даламбера не корректно в силу того, что на Земле отсутствует неподвижная точка — Земля вращается вокруг Солнца и в составе Солнечной системы вокруг Галактики, и необходимое и достаточное условия теоремы (Сахарный, 1964, с. 378–380) не выполняются. Следовательно, отсутствуют и физически обоснованные причины для использования концепции силы в качестве основополагающей в задачах геодинамики и тектонофизики.

В этой связи вызывает недоумение одно из последних высказываний Л.И. Лобковского: «Показано, что постулат о твердотельном вращении плит по поверхности Земли (так называемая теорема Эйлера), на котором основаны кинематические построения тектоники плит, далеко не всегда применим. ... Предполагается обобщение классической теории тектоники плит, в котором плиты рассматриваются как деформируемые тела — **тектоника деформируемых литосферных плит**. Обосновывается новая региональная геодинамическая модель, описывающая меловую и кайнозойскую эволюцию литосферы Арктики и Северо-Восточной Азии» (Лобковский, 2016, с. 345–346). Во-первых, для тектоники плит теорема Эйлера или Эйлера–Даламбера далеко не «так называемая», она, повторяем — одна из основополагающих гипотез. Во-вторых, если теорема не работает на планетарном уровне, то она не может работать и на региональном. Более того, теорема Эйлера–Даламбера — математическая, по сути, отражающая только геометрическую особенность Земли — ее сферическую форму. Применение такой теоремы не может определяться ни геологическими свойствами горных пород и их геодинамическим (тектонофизическим) состоянием — напряженным или ненапряженным, ни и их возрастом — меловой, кайнозойский или кембрийский.

Таким образом, были приведены данные, показывающие физическую и геодинамическую несостоятельность общепринятой в тектонике плит схемы построения механической задачи, в основе которой в качестве основополагающей заложена концепция силы. Как результат, в тектонике плит отпадает необходимость и объекта приложения силы — конвекционных течений в мантии. И, следовательно, в рецензируемой статье — термогравитационной конвекции в качестве движения, вызывающего деформацию

земной коры в пределах мелкомасштабных ячеек эпиплатформенных орогенов. Более того, согласно данным инструментальных геодезических наблюдений предлагаемый авторами рецензируемой статьи механизм деформации земной коры, «оказался трудно объяснимым в рамках динамики астеносферных процессов» (Кузьмин, 2013, с. 29).

Концепция движения. Красивый физический результат, как оригинальный анализ представленной механики (движения, деформации, напряжения и силы), был получен Ю.О. Кузьминым (Кузьмин, 2009, с. 45): «непосредственной причиной деформаций является *движение, а не силы*» (выделено АВ). Очевидно, что к такому физическому выводу в приложении к геодинамике следует добавить: *движение геосреды*, ее вполне *определенного объема*. Согласно инструментальным геодезическим данным, минимальная величина временного интервала t_{min} , необходимого для проведения одного геодезического измерения, составляет $t_{min} = 0.1-1$ год (Кузьмин, 2004). Согласно данным о деформационных волнах, скорости которых составляют $V_w = 4-90$ км/год (Кузьмин, 2012), характерный размер взаимодействующих посредством волн между собой объемов геосреды может быть определен из условия $l_0 = V_w \cdot t_{min} = 0.4-90$ км ≈ 50 км.

Таким образом, замена основополагающей в геодинамике (тектонофизике) концепции «сила» на концепцию «движение», по сути, приводит к «разломно-блоковой» дилемме (Кузьмин, 2013) и/или известным представлениям о блоковом строении геосреды (Садовский, 1979), тектонофизические (геодинамические) свойства которой определяются физикой волнового взаимодействия блоков между собой.

В рецензируемой статье, как видим, элементы блокового строения геосреды в виде ячеек протяженностью 100–200 км формально присутствуют, но отвечающие за такое ее строение эпиплатформенные орогены рассматриваются изолированно друг от друга, без учета их взаимодействия между собой. Другими словами, выше приведены данные, которые показывают, что положения авторов: мелкомасштабная конвекция «может считаться ответственной за тектонофизическое состояние коры», и как следствие, «за рельеф земной поверхности», не могут рассматриваться как физически и геодинамически обоснованными.

Концепция момента импульса. Первым основополагающим положением механики вращающегося твердого тела является независимость угловой скорости от жестко связанной с телом системы координат; все такие системы вращаются вокруг параллельных друг другу осей с одинаковой угловой скоростью (Ландау, Лифшиц, 1973). Это позволяет для геосреды

применить концепцию «момент импульса», которым обладает любой ее блок. Вследствие поступательного движения верхней мантии вдоль поверхности Земли происходит изменение направления момента, что в соответствии с законом его сохранения приводит к появлению момента силы, прикладываемого к поверхности блока со стороны окружающей его среды. Как видим, движение блоковой вращающейся среды – геосреды, вдоль поверхности Земли приводит в полном соответствии с законами физики к «закачке» в нее упругих напряжений с моментом силы (Викулин, 2008). В рамках ротационных моментно-блоковых представлений, очевидно, отсутствует необходимость поиска и источников сил, и объектов их приложения — они, тектонофизически, оказываются взаимосвязанными. Не учет таких представлений и приводит в рамках тектоники плит к построениям, во многом умозрительным и лишенным и физических, и геодинамических обоснований.

Как видим, концепция «движение» оказалась достаточно плодотворной. В рамках блочных представлений оказалось возможным сформулировать концепцию «момент импульса», в условиях вращающейся Земли оказавшейся физически более обоснованной, чем концепция «силы».

С использованием концепции момента импульса была разработана ротационная модель (Викулин, 2008; Викулин, Иванчин, 2013). В рамках такой модели удалось описать установленные геологами свойства геосреды: энергонасыщенности (Пономарев, 2008), реидности (Леонов, 2008; Carey, 1954) и способности образовывать вихревые геологические структуры (Вихри ..., 2004; Ротационные ..., 2007; Lee, 1928), и закономерности геодинамического процесса: природу сейсмического момента землетрясения, миграцию сейсмичности и вулканизма, их взаимосвязь, природу Чандлеровского колебания полюса планеты и др. (Викулин, 2011; Викулин и др., 2016). Кора всей Земли имеет блоковое строение, поэтому ротационная модель и полученные в ее рамках результаты применимы для исследования геодинамических движений в пределах и активных, и пассивных (менее активных) регионов. Как показано Ю.О. Кузьминым (1996), такие регионы различаются только типами активности, которые между собой сопоставимы по их энергетическим характеристикам. Исходя из этого можно говорить о несостоятельности утверждения авторов рецензируемой статьи о том, что мелкомасштабная конвекция «является *единственной* из потенциально ответственных за тектонофизическое состояние геосреды» (выделено АВ).

ОБ УРАВНЕНИЯХ ДВИЖЕНИЯ ГЕОСРЕДЫ И ЕЕ НЕЛИНЕЙНЫХ СВОЙСТВАХ

В рецензируемой работе астеносфера моделируется линейно-вязким телом Ньютона и исследование особенностей ее движения проводится с помощью уравнения Навье–Стокса (1), которое записано в инерциальной, не вращающейся, системе координат, что несколько странно: геосреда вместе с Землей должна рассматриваться как вращающееся тело. При этом рассматривается тектонофизическая интерпретация полученных в статье результатов в течение геологических отрезков времени протяженностью в десятки – сто миллионов лет и более. И не проводится никаких количественных оценок, которые бы поясняли, почему авторы пренебрегают соответствующими ротационными членами в уравнении движения вязкой астеносферы — в уравнении Навье–Стокса (1) и, соответственно, в выражении для тензора напряжений (2).

Авторами отмечается, что «решаемая геомеханическая задача является нелинейной. Возникновение нелинейности связано с изменением геометрии основных границ (кровли и подошвы коры) литосферы». При этом не поясняется, о какой именно нелинейности в работе идет речь и как она связана с геодинамическим процессом и/или геологическими свойствами верхней мантии, коры, литосферы и астеносферы.

Ротационный фактор в геодинамике. Анализ большого геологического, геофизического и физического материала показал важность учета ротационного фактора при изучении движений и геологической, и геофизической сред — геосреды (Вихри ..., 2004). «Речь идет о сложнейшем комплексе вращательных движений, совершаемых нашей планетой ... вокруг своей оси ... вокруг Солнца ... и вокруг центра Галактики. И все эти ротационные движения находят свое отражение в геологических процессах» (Ротационные ..., 2007, с. 9–14). Более того, согласно работе (Хаин, Полетаев, 2007, с. 21): «ротационный режим должен служить отправным моментом и основой численного и физического моделирования любых геологических (как и всех других) процессов».

Другими словами, прежде чем переходить к моделированию геологического процесса в оргенах и к постановке соответствующей физико-математической задачи для вязкой астеносферы, авторы рецензируемой статьи должны были оценить возможный вклад в ее решение вращения Земли и только после этого приступать к составлению (выбору) уравнения движения. Как видим, используемые в рецензируемой работе уравнение движения геосреды (1) и, соответственно, выражение для тензора напряжений (2) без

дополнительных пояснений не могут быть использованы для исследования движений вязкой вращающейся литосферы: они должны содержать, в том числе, и соответствующие ротационные члены. Более того, ссылка в рецензируемой статье на работу (Ландау, Лифшиц, 1988) некорректна и, по сути — неправильная. Авторы работы (Ландау, Лифшиц, 1988), прежде чем перейти к выводу уравнения Навье–Стокса в инерциальной, не вращающейся, системе координат, разобрали основные движения, возникающие и во вращающихся жидкостях: случай циркуляции скорости и волны во вращающейся жидкости. Возможность вихревых движений вращающейся жидкости была показана еще Б. Риманом в середине XIX в. (Бассет, 2014; Викулин, 2005); в настоящее время его решения широко используются в задачах и геофизики и физики звезд (Кондратьев, 2003).

Ротационный фактор заложен, по сути, в самой основе описанной выше концепции момента импульса. В рамках ротационной модели показывается, что движение блока во вращающейся системе координат механически равнозначно его движению с собственным моментом в инерциальной системе координат (Викулин и др., 2016). Это позволяет геодинамические задачи в рамках ротационной модели ставить в инерционных, не вращающихся, системах отсчета, что в значительной степени облегчает их решение. При этом взаимодействие блоков носит волновой характер, его физическим аналогом является корпускулярно-волновой дуализм, что, согласно работам Кузьмина (1996, 2004, 2009, 2013), находится в полном согласии с данными, вытекающими из современных геодезических инструментальных наблюдений и их анализа в применении к современной геодинимике.

Нелинейные свойства геосреды. Проблема нелинейности в геодинимике подробно обсуждалась в работах (Викулин, 2013; Викулин и др., 2016). Кратко суть проблемы сводится к следующему. Понятие нелинейности в науке пришло из физики, где каждая нелинейность (их много, и все они имеют разную природу) строго количественно определена соответствующим членом уравнения движения среды или ее состояния. В геодинимике же этот термин используется, как правило, совершенно произвольно и каждый исследователь часто в него вкладывает свой смысл, который никак не конкретизирует. Не являются исключением и авторы рецензируемой статьи.

Можно отметить, что в рамках ротационной модели оказывается возможным наметить путь количественного подхода к оценке нелинейностей и геосреды, и протекающего в ее пределах геомеханического (тектонофизического) про-

цесса. В частности, показано, что энергонасыщенность геосреды (Пономарев, 2008) связана с ее нелинейным свойством (Викулин, Иванчин, 2013), физическим аналогом которого может являться структурная нелинейность (Викулин и др., 2016). Вероятно, с нелинейными свойствами геосреды связаны и ее реидность (Викулин, 2013) и способность образовывать вихревые геологический структуры (Викулин, 2014).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Тема рецензируемой статьи важна, в первую очередь, для понимания как сути и духа возможных физических толкований основных концепций современной геодинимике, так и математической корректности их применения при решении соответствующих тектонофизических задач. Работа, по сути, постановочная; видимо, по этой причине аннотация статьи написана специфическим языком и вряд ли будет понятна широкому кругу читателей. В работе много внимания уделено чисто математическим проблемам решаемой авторами задачи и слабо представлено ее геодинимическое (тектонофизическое) содержание. Неоднозначное понимание некоторых ее положений и результатов связано, в том числе, с процессом становления некоторых геологических наук, в первую очередь, геодинимике и тектонофизики (Викулин, 2005, 2013, 2014; Викулин и др., 2016; Вихри ..., 2004; Гончаров и др., 2005; Кузьмин, 1996, 2004, 2009, 2013; Лобковский и др., 2004; Ротационные ..., 2007; Теркот, Шуберт, 1985; Хаин, Ломизе, 2005). Именно на такие спорные и дискуссионные моменты автор настоящего отзыва и старался обратить внимание читателей.

Затронутые в отзыве вопросы могут иметь отношение не только к рецензируемой работе, их можно поставить и перед авторами многих других работ геодинимической и тектонофизической направленности. Для понимания таких вопросов необходима дискуссия в рамках разных специальностей.

Список литературы

- Артюшков Е.В.* Геодинимика. М.: Наука, 1979. 328 с.
Артюшков Е.В. Физическая тектоника. М.: Наука, 1993. 456 с.
Бассет А.Б. Трактат по гидродинамике. Т. 2. М.–Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2014. 404 с.
Викулин А.В. Ротационные упругие поля в твердых телах и вихревые решения проблемы Дирихле: тождественные системы? // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2005. № 6. С. 89–99.

- Викулин А.В.* Энергия и момент силы упругого ротационного поля // Геология и геофизика. 2008. Т. 49. № 6. С. 559–570.
- Викулин А.В.* Сейсмичность. Вулканизм. Геодинамика. Сборник трудов. Петропавловск—Камчатский: КамГУ, 2011. 407 с.
- 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. Вып. 21. С. 163–168.
- Викулин А.В.* Проблема вихревых движений в геологии (отзыв на статью Е.Г. Мирлина, Ю.В. Миронова «Роль вихревого движения в геодинамике Эгейского моря (на основе сравнительного анализа с геодинамикой котловины Вудларк)») // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2014. № 2. Вып. 24. С. 186–190.
- Викулин А.В.* Ротационная вихревая геодинамика как основа новой парадигмы геологии // Тектоника, геодинамика и рудогенез складчатых поясов и платформ. Материалы 48-го Тектонического совещания. Т. 1. М.: ГЕОС, 2016. С. 69–73.
- Викулин А.В., Иванчин А.Г.* О современной концепции блочно-иерархического строения геосреды и некоторых ее следствиях // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых (ФТПРПИ). 2013. № 3. С. 67–84.
- Викулин А.В., Махмудов Х.Ф., Иванчин А.Г., Герус А.И., Долгая А.А.* О волновых и реидных свойствах земной коры // Физика твердого тела. 2016. Т. 58. Вып. 3. С. 547–557.
- Вихри в геологических процессах / Ред. А.В. Викулин. Петропавловск-Камчатский: КГПИ, 2004. 297 с.
- Гончаров М.А., Талицкий В.Г., Фролова Н.С.* Введение в тектонофизику. М.: КДУ, 2005. 496 с.
- Кондратьев Б.П.* Теория потенциала и фигуры равновесия. М.—Ижевск: Институт компьютерных технологий, 2003. 624 с.
- Кузьмин Ю.О.* Современные суперинтенсивные деформации земной поверхности в зонах платформенных разломов // Геологическое изучение и использование недр. Информационный выпуск 4. М.: Комитет РФ по геологии и использованию недр, 1996. С. 43–53.
- Кузьмин Ю.О.* Современная геодинамика разломных зон // Физика Земли. 2004. № 10. С. 95–111.
- Кузьмин Ю.О.* Тектонофизика и современная геодинамика // Физика Земли. 2009. № 11. С. 44–59.
- Кузьмин Ю.О.* Современная геодинамика разломов и парадоксы скоростей деформации // Физика Земли. 2013. № 5. С. 28–46.
- Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Теоретическая физика. Т. 1. Механика. М.: Наука, 1973. 208 с.
- Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Теоретическая физика. Т. VI. Гидродинамика. М.: Наука, 1988. 736 с.
- Леонов М.Г.* Тектоника консолидированной коры. М.: Наука, 2008. 457 с.
- Лобковский Л.И.* Тектоника деформируемых литосферных плит и геодинамическая модель эволюции Арктики и Северо-Восточной Азии в мелу и кайнозойе // Тектоника, геодинамика и рудогенез складчатых поясов и платформ. Материалы 48-го Тектонического совещания. Т. 1. М.: ГЕОС, 2016. С. 345–346.
- Лобковский Л.И., Никишин А.М., Хаин В.Е.* Современные проблемы геотектоники и геодинамики. М.: Научный мир, 2004. 612 с.
- Пономарев В.С.* Энергонасыщенность геологической среды. М.: Наука, 2008. 379 с.
- Ротационные процессы в геологии и физике / Ред. Е.Е. Милановский. М.: КомКнига, 2007. 528 с.
- Садовский М.А.* Естественная кусковатость горной породы // ДАН. 1979. Т. 247. № 4. С. 829–832.
- Сахарный Н.Ф.* Курс теоретической механики. Учебное пособие. М.: Высшая школа, 1964. 844 с.
- Теркот Д., Шуберт Дж.* Геодинамика. Геологические приложения физики сплошных сред. Т. 1. М.: Мир, 1985. 376 с.
- Хаин В.Е., Ломизе М.Г.* Геотектоника с основами геодинамики. М.: КДУ, 2005. 560 с.
- Хаин В.Е., Полетаев А.И.* Ротационная тектоника Земли // Наука в России. 2007. № 6. С. 14–21.
- Carey S.W.* The rheid concept in geotectonics // Bull. Geol. Soc. Austral. 1954. V. 1. P. 67–117.
- Lee J.S.* Some characteristic structural types in Eastern Asia and their bearing upon the problems of continental movements // Geol. Mag. 1928. LXVI. P. 422–430.

А.В. Викулин,
в.н.с. ИВиС ДВО РАН, д.ф.-м.н.