

РОЛЬ КОЭФФИЦИЕНТА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НА ГРАНИЦАХ ИНДО-АВСТРАЛИЙСКОЙ ПЛИТЫ ПРИ ЧИСЛЕННОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ПОЛЯ НАПРЯЖЕНИЙ

А.И. Коптев¹, А.В. Ершов², О.В. Левченко³

¹ - ISTEP UMR CNRS 7193, Universite Pierre et Marie Curie, Paris, France, alexander.koptev@upmc.fr

² - МГУ им. М.В. Ломоносова, геологический факультет, г. Москва

³ - Институт Океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва

В настоящей работе представлены результаты численного моделирования напряженного состояния в пределах Индо-Австралийской плиты и прилегающих к ней областей.

В отличие от работ по численному моделированию напряженного состояния для Индо-Австралийской плиты в целом и для отдельных областей, входящих в ее пределы [Sandiford et al., 1995; Coblenz et al., 1995, 1998; Reynolds et al., 2002; Burbidge, 2004; Погорелов и Баранов, 2010; Погорелов, 2011 и др.], которые были направлены на выявление природы и относительной роли различных источников в формировании современного поля напряжений, мы намеренно упрощаем задачу, ограничиваясь только одним источником внутриплитных напряжений (силы разности гравитационного потенциала). При этом, в данной работе предпринята попытка оценить, каким образом введение разных условий на различных по своей геодинамической позиции участках границ литосферных плит может менять модельные поля напряжений.

Рассчитанные нами модели показывают, что даже при использовании одного и того же источника напряжений (силы разности гравитационного потенциала), введение ослабленного взаимодействия на соответствующих участках границы Индо-Австралийской плиты приводит к значительному перераспределению напряжений (в частности, к их локализации в областях с высокой степенью межплитного взаимодействия).

МЕТОДИКА

Моделирование поля напряжений производилось с использованием программного кода «*Earth Stresses*», который является авторской разработкой и который ранее был успешно применен для построения глобальных моделей напряженного состояния литосферы Земли [Koptev, Ershov, 2008; Коптев, 2009; Коптев, 2010; Коптев, Ершов 2010]. В этот программный код заложен специальный алгоритм для расчетов распределения напряжений на сферической оболочке, представляющий собой некоторую модификацию решения плоской двумерной задачи.

Поле напряжений σ_{ij} рассчитывалось путем численного решения уравнения равновесия

$$\sum_{i=1}^3 \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_i} + F_j = 0. \quad (1)$$

Под полем внешних сил F_i в настоящей работе понимались силы разности гравитационного потенциала, расчет которых сводился к количественной оценке разности интегралов распределения по глубине литостатического давления [Artyushkov, 1973; Артюшков, 1979].

Уравнение (1) количественно решалось методом конечных объемов с использованием явной консервативной численной схемы в Лагранжевых координатах. Расчетная сетка представляла собой набор ячеек четырехугольной формы.

Разработанная методика допускает возможность «разрезания» сетки вдоль границ ячеек. Для узлов, лежащих на линии «разреза», задается коэффициент, параметризующий степень влияния центрированных в ячейках величин (напряжений и пр.) в ячейках по разные стороны «разреза» на расчет величин, центрированных в узлах на «разрезе» (скорости смещений, силы и пр.). Таким образом, при расчете баланса сил для узлов, лежащих на линии «разреза», учитывается вклад тех ячеек, которые лежат по одну из сторон от линии «разреза», плюс вклад ячеек по другую сторону «разреза», но умноженный на заданный коэффициент.

Единичное значение коэффициента в какой-либо ячейке, по сути, равнозначно отсутствию «разреза» в данном месте расчетной сетки. При обращении коэффициента в нуль узлы, лежащие на «разрезанной» границе и принадлежащие ячейкам, лежащим по разные стороны «разреза», могут смещаться абсолютно независимо.

Возможность проводить расчеты на сетке с «разрезами» позволяет включать в модель линии разломов и границы литосферных плит, причем, изменяя коэффициент взаимодействия вдоль «разрезанной» границы, можно задавать границы разных типов на данном участке расчетной сетки (зона спрединга, субдукции, коллизии и пр.).

В рамках настоящей работы построено четыре различные модели, границы расчетной области которых лежат в пределах от 56.34° до 183.946° по долготе и от -74.925° до 54.925° по широте. Для каждой модели разрешение расчетной сетки составляло $0.15^\circ \times 0.15^\circ$ при суммарном количестве ячеек 736966.

В первой модели (модель 1) границы литосферных плит никак не учитывались, а во второй модели (модель 2) учет границ Индо-Австралийской плиты производился следующим образом: на коллизионных участках этой границы (Гималаи, Новая Зеландия и Папуа-Новая Гвинея) коэффициент взаимодействия между плитами принимался равным 1, а на всех прочих – 0. Третья рассчитанная модель (модель 3) отличается от двух предыдущих тем, что в данном случае расчеты производились только для ячеек, попадающих в пределы Индо-Австралийской плиты. Модель 4 схожа по постановке с моделью 3: единственное отличие заключается в установке значения 0.1 вместо 0 на неколлизионных участках границы Индо-Австралийской плиты. Географические координаты границ литосферных плит были взяты по данным цифровой модели П. Берда [Bird, 2001].

В качестве начальных условий всех рассчитанных моделей выступали нулевые скорости смещений и напряжения, а в качестве граничных – зафиксированные северная и южная границы расчетной области (для моделей 1, 2 и 4) или фиксированные коллизионные участки (Гималаи, Новая Зеландия и Папуа-Новая Гвинея) границы Индо-Австралийской плиты (для модели 3).

Для оценки степени достоверности рассчитанных моделей необходимо выполнить сравнение с имеющимися данными замеров напряженного состояния литосферы Земли.

В качестве критерия соответствия расчетных данных фактическим обычно используются степень совпадения режима напряжений (процентная доля совпадений по отношению к общему числу точек сравнения) и/или среднеквадратичная разница углов между главными осями расчетного и наблюдаемого тензоров напряжений [Burbidge, 2004; Liu, Bird, 2002]. В настоящей работе предлагается альтернативный критерий.

Поскольку замеры распределены в пространстве крайне неравномерно, количественное сопоставление модельных результатов с фактическими данными возможно только в случае выполнения интерполяции последних на всей (или большей части) области моделирования с использованием каких-либо статистических алгоритмов. Мы использовали данные «Мировой Карты Напряжений» [Heidbach et al., 2008] для выполнения интерполяции и экстраполяции усредненных данных замеров на узлы регулярной сетки согласно методике, описанной в работе [Коптев и др., 2013].

Для каждой ячейки «сетки сравнения», в которой получены интерполированные по данным «Мировой Карты Напряжений» значения «измеренных» напряжений, рассчитывалось среднеквадратичное отклонение каждой из горизонтальных компонент «измеренного» и рассчитанного нормированного тензора напряжения, т.е. в каждой ячейке находилось три квадрата разницы между горизонтальными компонентами нормированного на единицу расчетного и «измеренного» тензора (интерполированный тензор также нормирован на единицу, согласно принятой методике интерполяции; компоненты тензора брались в локальной системе координат ячейки, в которой ось y направлена на север, ось x – на восток). Среднее значение этих квадратов и принималось в качестве критерия степени соответствия модельных расчетов наблюдаемым данным в текущей ячейке. Такой подход позволяет получить в достаточной мере независимую и объективную меру соответствия модельных построений наблюдаемым данным, что крайне полезно с точки зрения оценки качества модели в текущей ячейке расчетной сетки.

Для оценки качества расчетной модели в целом на основании знания степени ее соответствия фактическим данным в отдельных ячейках могут быть использованы различные подходы, наиболее простым из которых является оценка среднего арифметического значения среди полученных в ячейках величин. Однако существенным недостатком такого способа является тот факт, что даже при хорошем соответствии в большинстве ячеек наличие всего нескольких, в которых отклонения очень большие, может идентифицировать модель как плохую. Поэтому в качестве дополнительного критерия нами предлагается рассчитывать процентную долю ячеек, в которых соответствие расчетных и фактических данных составляет более 80%.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 1, 3 и 4 показаны поля напряжений моделей 1, 2 и 3 соответственно (поле напряжений модели 4 не приводится по причине его практически полной визуальной идентичности полученному в модели 3), а на рис. 2 – результаты статистической обработки «Мировой Карты Напряжений» [Heidbach et al., 2008], выполненной по описанной в работе [Коптев и др., 2013] методике.

Рис. 5 и 6 иллюстрируют распределение выраженного в процентах соответствия между фактическими данными (результаты обработки «Мировой Карты Напряжений») и моделями 1 и 2 соответственно для территории Индо-Австралийской плиты. В табл.1 приведены коэффициенты соответствия между рассчитанными моделями и фактическими данными: усредненные по ячейкам значения соответствия и доли количества ячеек с соответствием, превышающим 80%. Эти коэффициенты рассчитывались только для тех ячеек расчетной сетки, которые попадали в пределы Индо-Австралийской плиты, и указаны для всех четырех рассчитанных в рамках настоящей работы моделей, а также для глобальной модели поля напряжений, описанной в работе [Коптев, Ершов, 2010].

Визуальное сравнение поля напряжений модели 1 (рис. 1) с фактическими данными (рис. 2), а также низкие значения коэффициентов, количественно иллюстрирующих качество модели (табл. 1), показывают, что многие существенные особенности наблюдаемого регионального поля напряжений в этой модели не воспроизводятся.

Данное поле напряжений во многом схоже с полученным в аналогичной по постановке (источник напряжений – силы разности гравитационного потенциала; границы литосферных плит не учитываются) глобальной модели [Коптев, Ершов, 2010]. Однако чуть более высокие значения коэффициентов соответствия фактическим данным, получаемые в этой модели (табл. 1), демонстрируют некоторые преимущества глобальной модели над более детальной региональной, возникающие, вероятно, за счет учета внешних воздействий на рассматриваемый в региональной модели участок литосферы.

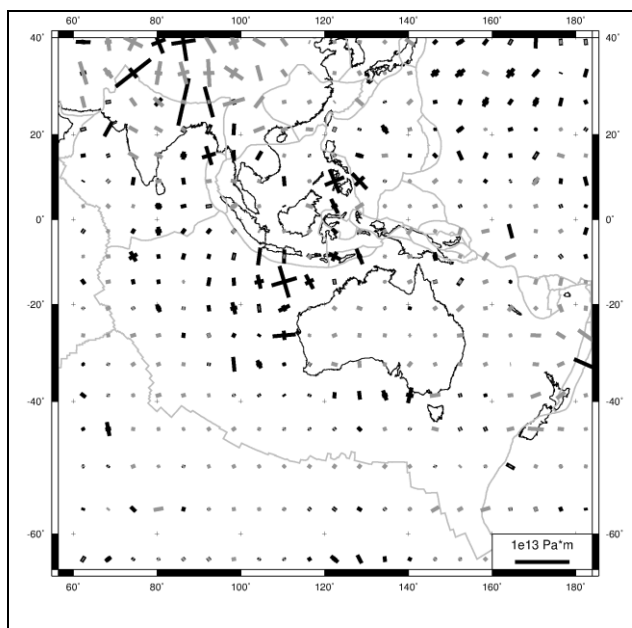


Рис. 1. Модель поля напряжений, не учитывающая границ литосферных плит (модель 1)
Черными линиями показаны главные оси сжатия, серыми – растяжения

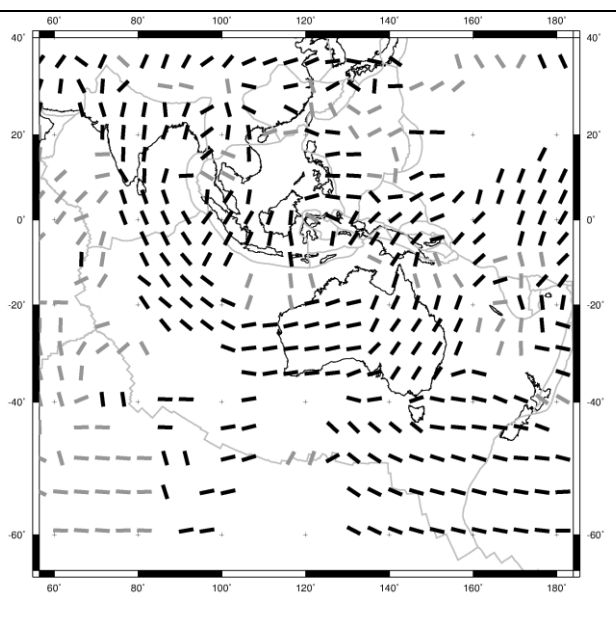


Рис. 2. Результаты статистической обработки данных «Мировой Карты Напряжений» [Heidbach et al., 2008], выполненной по методике [Коптев и др., 2013]. Параметры обработки: максимальная допустимая дисперсия 0,15; минимальное количество замеров 5.
Серыми линиями показаны ориентировки проекций на горизонтальную плоскость главных осей растяжения для сбросовых режимов напряжений; черными – главных осей сжатия для всех прочих режимов

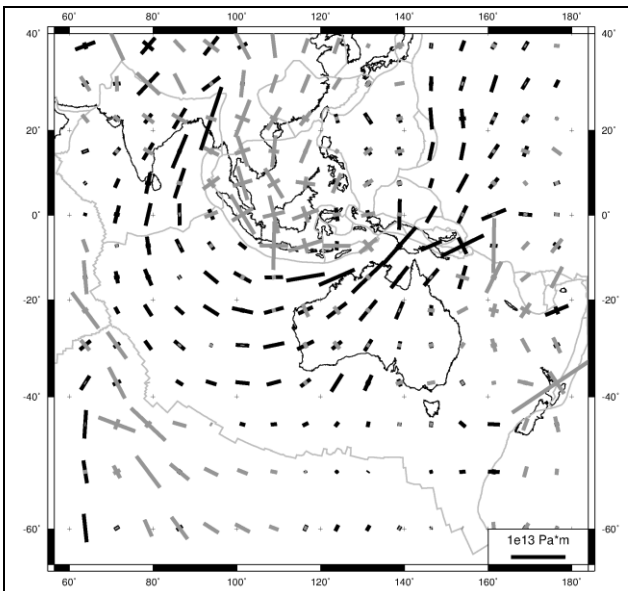


Рис. 3. Модель поля напряжений, учитывающая границы Индо-Австралийской плиты (модель 2). На коллизионных участках (Гималаи, Новая Зеландия и Папуа-Новая Гвинея) коэффициент взаимодействия между плитами принимался равным 1, а на всех прочих – 0. Черными линиями показаны главные оси сжатия, серыми – растяжения

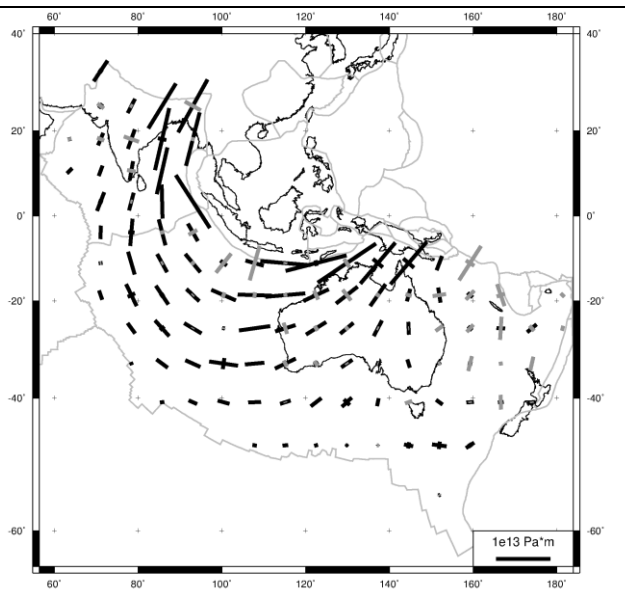


Рис. 4. Модель поля напряжений, рассчитанная только для области в пределах Индо-Австралийской плиты (модель 3). Граничные условия: зафиксированные коллизионные участки (Гималаи, Новая Зеландия и Папуа-Новая Гвинея) границы Индо-Австралийской плиты. Черными линиями показаны главные оси сжатия, серыми – растяжения

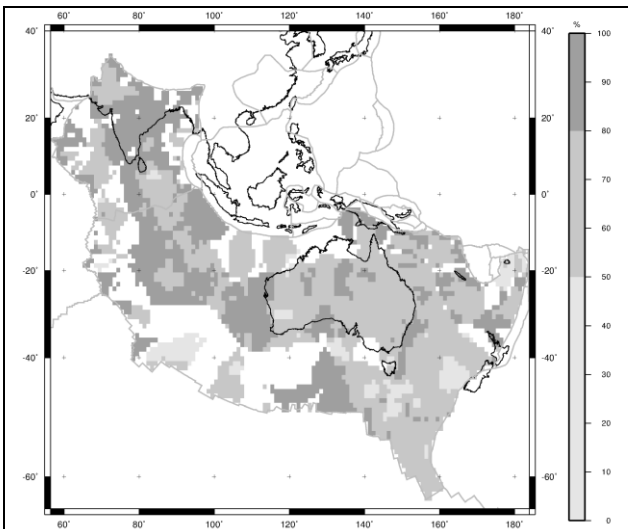


Рис. 5. Распределение степени соответствия между полем напряжений модели 1 (рис. 1) и результатами статистической обработки «Мировой Карты Напряжений» (рис. 2)

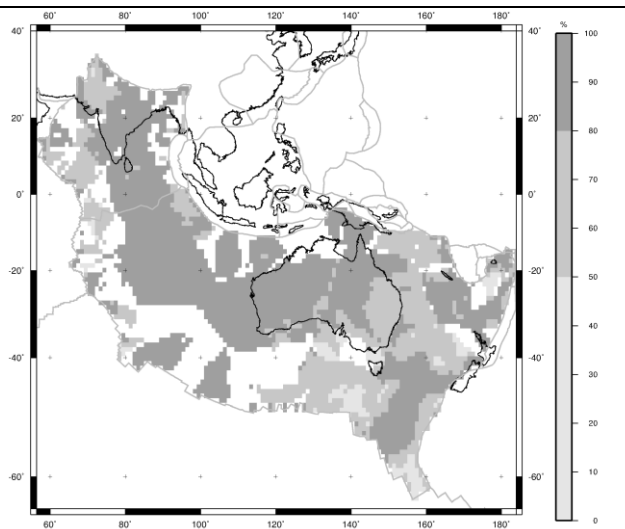


Рис. 6. Распределение степени соответствия между полем напряжений модели 2 (рис. 3) и результатами статистической обработки «Мировой Карты Напряжений» (рис. 2)

Модели 2 и 3 (рис. 3 и 4 соответственно) гораздо более точно воспроизводят постепенную смену ориентировок осей сжатия с СВ-ЮЗ в западной части Австралии до субмеридиональной в пределах п-ва Индостан, которая хорошо прослеживается на карте усредненных замеров напряженного состояния (рис. 2). Данная визуальная оценка подтверждается гораздо более высокими коэффициентами соответствия, полученными для этих моделей: более 2/3 ячеек с соответствием >80%; при том, что этот же параметр составлял менее 1/2 для модели 1 и глобальной модели (см. табл. 1). Распределение соответствия фактическим данным по площади для модели 2 также указывает на то, что к северо-западу от западной Австралии большая часть площади Индо-Австралийской плиты характеризуется высоким (> 80%) соответствием модельных и фактических данных (рис. 6).

Таблица 1. Коэффициенты соответствия между рассчитанными моделями напряженного состояния Индо-Австралийской плиты и результатами статистической обработки данных «Мировой Карты Напряжений»

<i>Модель</i>	<i>Среднее соответствие (%)</i>	<i>Процентная доля ячеек с соответствием > 80 % (%)</i>
Глобальная модель [см. Коптев, Ершов, 2010]	76.998	48.435
Модель 1 (Модель, не учитывающая границ литосферных плит)	74,197	40.071
Модель 2 (Модель, учитывающая границы Индо-Австралийской плиты. На коллизионных участках коэффициент взаимодействия между плитами принимался = 1, на всех прочих – 0)	82.328	66.533
Модель 3 (Модель поля напряжений, рассчитанная только для области в пределах Индо-Австралийской плиты. Граничные условия: зафиксированные коллизионные участки границы)	84.494	71.953
Модель 4 (Модель, учитывающая границы Индо-Австралийской плиты. На коллизионных участках коэффициент взаимодействия между плитами принимался = 1, на всех прочих – 0.1)	82.339	66.343

В ранее опубликованных работах [Coblentz et al., 1998] было показано, что при моделировании поля напряжений только в пределах Индо-Австралийской плиты локализация напряжений сжатия на коллизионных участках северной границы плиты (Гималаи и Новая Зеландия) происходит в том случае, если производить «фиксацию» (т.е. установку нулевых смещений в качестве граничных условий) только в этих зонах, оставляя прочие участки границы «свободными». Наша модель 3 (см. рис. 4), рассчитанная в подобной постановке, подтверждает этот вывод. Важно отметить практически идентичное распределение напряжений внутри Индо-Австралийской плиты, полученное в моделях 2 и 3. Это позволяет говорить о том, что установка стопроцентного взаимодействия на коллизионных границах при полном «разрезании» на границах других геодинамических типов дает аналогичный эффект с «фиксированием» этих коллизионных зон в моделях, ограниченных по площади своего распространения границами Индо-Австралийской плиты. При этом очевидно, что модели, рассчитанные для территории, ограниченной границами какой-либо плиты, уступают моделям, которые включают в себя прилегающие к этой плите области, хотя бы потому, что в первом случае необходимо учитывать влияние сил, действующих на плиту извне (например, силы гравитационного растекания прилегающих к плите орогенов), и задавать их в качестве дополнительных граничных условий, а во втором эти источники учитываются более корректно «автоматически».

Схожее распределение напряжений в моделях 2 и 4, отражающееся также и в практически идентичных значениях коэффициентов соответствия фактическим данным (табл. 1), указывает на то, что модель мало чувствительна к синхронным и относительно небольшим изменениям коэффициента взаимодействия на неколлизионных границах Индо-Австралийской плиты.

Наиболее проблемным участком Индо-Австралийской плиты с точки зрения согласованности модельных и фактических данных является восточная часть Австралийского континента: на этой территории происходит достаточно резкая смена ориентировок осей сжатия на ССВ-ЮЮЗ (вместо ВСВ-ЗЮЗ в восточной части Австралии), которая ни в одной из рассчитанных моделей не воспроизводится. Возможно, это может быть связано с учетом в этих моделях сил затягивания в

Меланезийскую зону субдукции (желоб Сан-Кристоваль), где в течение последних 6 млн. лет происходит погружение Индо-Австралийской плиты [Austermann et al., 2011].

ВЫВОДЫ

Многие работы по моделированию полей напряжений имеют своей целью определить относительную роль различных источников (силы мантийных течений, силы затягивания в зону субдукции, обобщенные топографические силы) в формировании наблюдаемого поля напряжений [напр. глобальные модели Bird, 1998; Bird, Liu, 1999; Conrad, Lithgow-Bertelloni, 2002; Lithgow-Bertelloni, Guynn, 2004; Bird et al., 2008]. Для этого рассчитываются модели, основанные на разных комбинациях этих источников, и производится сравнение результатов с фактическими данными для определения того, какая комбинация движущих сил дает в конкретном случае наилучшее совпадение.

Однако, как показано в настоящей работе, не вполне точное соответствие модельных и наблюдаемых данных может быть связано не с тем, что в модель не включены необходимые источники напряжений, а просто с отсутствием в модели правильно заданных зон ослабленного взаимодействия. Добавление таких зон (в рассматриваемом случае, это неколлизионные границы Индо-Австралийской плиты) может приводить к значительным изменениям модельного поля напряжений (в том числе, в сторону более хорошего соответствия фактическим данным).

При этом необходимость учета как можно большего количества источников напряжений остается для некоторых областей моделируемой среды очень высокой. Приведенный выше пример с не вполне хорошим соответствием расчетных данных фактическим для западной части Австралии наглядно иллюстрирует необходимость включения в модель дополнительных источников (например, сил затягивания в зону субдукции).

С другой стороны, сжатие, перпендикулярное простиранию зоны субдукции на участке Индо-Австралийской плиты, прилегающем к о. Суматра, также не воспроизведено в моделях с «разрезанной» субдукционной границей плит, что отражается в пониженных значениях критерия соответствия фактическим данным на этой территории (рис. 6). Но в модели 1, предполагающей полную сплошность среды, данный участок наоборот характеризуется высокими значениями (> 80%) степени соответствия данным «Мировой Карты Напряжений» (рис. 5). Таким образом, можно предположить, что введение на данном участке границы Индо-Австралийской плиты более высокого коэффициента взаимодействия с прилегающими территориями будет более правильным решением проблемы, чем введение каких-либо новых источников напряжений.

Полученные в настоящей работе результаты показывают, что при моделировании напряженного состояния корректный учет взаимодействия среды на границах крупных литосферных блоков является не менее важным фактором, чем выбор правильного набора действующих на литосферу тектонических сил.

Работа выполнена при частичной поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы, согл. № 8615, проекта РФФИ № 12-05-33066 ВЕД_МОЛ_А и проекта РФФИ № 13-05-01079 А

ЛИТЕРАТУРА

- Артюшков Е.В.* Геодинамика. М.: Наука. 1979. 327 с.
- Коптев А.И.* Компьютерная модель напряженного состояния в литосфере Земли. // Материалы XLIII Тектонического совещания «Тектоника и геодинамика складчатых поясов и платформ фанерозоя», т.1. Москва, МГУ, 2-5 февраля 2010 г., М.: 2010. С. 356-359.
- Коптев А.И.* Математическое моделирование напряженного состояния в литосфере Земли. // Материалы российской конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной «Году Планеты Земля» «Планета Земля: актуальные вопросы геологии глазами молодых ученых», Т. 1. Москва, МГУ, 6-7 апреля 2009 г., М.: 2009. С. 47-52.
- Коптев А.И., Еришов А.В.* Роль гравитационного потенциала литосферы в формировании глобального поля напряжений. // Физика Земли. 2010. №12. С. 66-81.
- Коптев А.И., Еришов А.В., Маловичко Е.А.* Напряженное состояние литосферы Земли: результаты статистической обработки данных «Мировой Карты Напряжений» // Вестник Московского Университета. сер.4. Геология. 2013. №1. С.19-27.

- Погорелов В.В., Баранов А.А.* Гравитационные напряжения в земной коре Центральной Азии // Геофизические исследования. 2010. Т. 11, № 3. С. 72-84
- Погорелов В.В.* Тектонофизический анализ напряжений земной коры Зондской сейсмоактивной области // Автореферат на соискание степени к. физ.-мат. наук. М.: ИФЗ РАН. 2011. -28 с.
- Artyushkov E.V.* Stresses in the lithosphere caused by crustal thickness inhomogeneities // *J. Geophys. Res.* 1973. Vol. 78. P. 7675-7708.
- Austermann J., Ben-Avraham Z., Bird P., Heidbach O., Schubert G., Stock J. M.* Quantifying the forces needed for the rapid change of Pacific plate motion at 6 Ma // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2011. Vol. 307. P. 289-297. doi:10.1016/j.epsl.2011.04.043.
- Bird P.* An updated digital model of plates boundaries. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems.* An electronic journal of the Earth sciences. Vol.4, no. 3, 14 march 14 1027, doi:10.1029/2001GC00025 2 ISSN: 1525-2027.
- Bird P.* Testing hypotheses on plate-driving mechanisms with global lithosphere models including topography, thermal structure, and faults // *J. Geophys. Res.* 1998. Vol. 103. P. 10,115-10,129.
- Bird P., Liu Z.* Global finite-element model makes a small contribution to intraplate seismic hazard // *Bull. Seismol. Soc. Am.* 1999. Vol. 89. P. 1642-1647.
- Bird P., Liu Z., Rucker W.K.* Stresses that drive the plates from below: Definitions, computational path, model optimization, and error analysis // *J. Geophys. Res.* 2008. Vol. 113. B11406, doi:10.1029/2007JB005460.
- Burbidge D.R.* Thin plate neotectonic models of the Australian plate // *J. Geophys. Res.* 2004. Vol. 109. 10405. doi: 10.1029/2004JB003156.
- Coblentz D.D., Sandiford M., Richardson R.M., Zho S., Hillis R.* The origins of the intraplate stress field in continental Australia // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1995. Vol. 133. P. 299-309.
- Coblentz D.D., Zhou S., Hillis R.R., Richardson R.M., Sandiford M.* Topography, boundary forces, and the Indo-Australian intraplate stress field // *J. Geophys. Res.* 1998. Vol. 103. P. 919-931.
- Conrad C.P., Lithgow-Bertelloni C.* How mantle slabs drive plate tectonics // *Science.* 298. Vol. 298. P. 207-209. doi:10.1126/science.1074161
- Heidbach O. et al.* The World Stress Map – Release 2008. 2008. Paris: Commission for the Geological Map of the World.
- Koptev A., Ershov A.* Modeling of global lithospheric stress field on the spherical Earth. // 3rd World Stress Map Conference. Potsdam, 15-17 October 2008.
- Lithgow-Bertelloni C., Gynn J.* Origin of the lithospheric stress field // *J. Geophys. Res.* 2004. Vol. 109. 01408. doi: 10.1029/2003JB002467.
- Reynolds S.D., Coblentz D.D., Hillis R.R.* Tectonic forces controlling the regional intraplate stress field in continental Australia: Results from new finite element modeling // *J. Geophys. Res.* 2002. Vol. 107 (B7). 2131. doi: 10.1029/2001JB000408.
- Sandiford M., Coblentz D., Richardson R.* Ridge torques and continental collision in the Indian-Australian plate // *Geology.* 1995. Vol. 23?, No7. P. 653-656.